

Библиотека

по

А

В

Т

О

М

А

Т

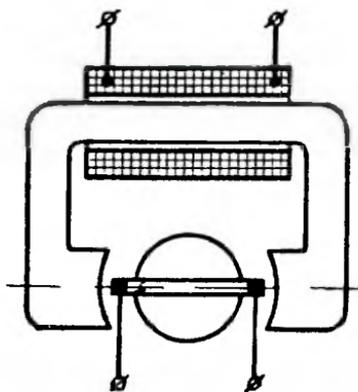
Е

К

Е

Ф. А. Ступель

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 141

Ф. А. СТУПЕЛЬ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ДАТЧИКИ
И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ,
СХЕМЫ, РАСЧЕТ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

Редакционная коллегия:

**И. В. Антик, А. И. Бергинов, С. Н. Вешеневский, Л. М. Закс,
Н. Е. Кобринский, В. С. Кулебакин, В. Э. Низе, В. С. Малов,
Б. С. Сотсков, А. С. Шаталов**

УДК 621.317.59:531.17
С88

В книге изложены вопросы, связанные с построением и применением электромеханических ферромагнитных датчиков разных видов: индуктивных, трансформаторных, ферродинамических, магнитоиндукционных и магнитоэлектрических.

Рассматриваются принципы действия датчиков и методика их расчета. Приводятся электрические и конструктивные схемы построения преобразователей неэлектрических величин с применением электромеханических датчиков.

Рассмотрены способы получения на выходе преобразователей информации различного вида: для систем автоматического регулирования, унифицированной — для машин централизованного контроля.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами автоматизации производственных процессов, а также студентов электротехнических специальностей.

Ступель Файвель Аронович

Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин, М.—Л., издательство „Энергия“, 1965, 116 с. с черт. (Библиотека по автоматике, вып. 141).

Тематический план 1964 г., № 263

Редактор *Д. И. Агейкин*

Техн. редактор *Н. А. Бульдяев*

Сдано в набор 24/III 1965 г.

Подписано к печати 17/V 1965 г.

Т-06534 Бумага 84×108^{1/2}_{за}

Печ. л. 5,94

Уч.-изд. л. 5,68

Тираж 17 000 экз.

Цена 28 коп.

Зак. 203

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,
Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 5 |
| Глава первая. Принцип действия электромеханических ферромагнитных датчиков и преобразователей . . . | 8 |
| 1-1. Классификация | 8 |
| 1-2. Одинарные индуктивные датчики — ОИД | 9 |
| 1-3. Дифференциальные индуктивные датчики — ДИД | 13 |
| 1-4. Дифференциальные трансформаторные датчики — ДТД | 15 |
| 1-5. Ферродинамические датчики — ФДД | 22 |
| 1-6. Магнитоиндукционные датчики — МИД | 24 |
| 1-7. Преобразователи ток — перемещение | 30 |
| Глава вторая. Измерительные комплекты | 34 |
| 2-1. Назначение измерительных комплектов | 34 |
| 2-2. Элементы схем измерительных комплектов | 35 |
| 2-3. Погрешности измерительных комплектов | 41 |
| 2-4. Коэффициент преобразования | 45 |
| 2-5. Включение реле в цепь датчиков | 47 |
| 2-6. Неравновесные мостовые схемы | 48 |
| 2-7. Схемы сравнения | 51 |
| 2-8. Компенсационные методы измерения | 54 |
| 2-9. Интегральные компенсационные системы измерения | 58 |
| 2-10. Примеры построения измерительных устройств с интегральной системой измерения | 61 |
| 2-11. Пропорциональные компенсационные системы измерения | 64 |
| 2-12. Примеры построения измерительных устройств с пропорциональной системой измерения | 67 |
| 2-13. Вычислительные операции | 73 |
| Глава третья. Вопросы расчета электромеханических датчиков и преобразователей | 77 |

| | |
|--|-----|
| 3-1. Напряжение и частота источников питания датчиков | 77 |
| 3-2. Материалы для магнитопроводов | 80 |
| 3-3. Расчет магнитных систем | 82 |
| 3-4. Предельная величина перемещения якоря в плоских индуктивных и трансформаторных датчиках | 90 |
| 3-5. Основные соотношения для расчета плоских датчиков | 91 |
| 3-6. Основные соотношения для расчета цилиндрических датчиков | 94 |
| 3-7. Напряжение небаланса датчиков | 95 |
| 3-8. Совместная работа датчиков | 97 |
| 3-9. Основные соотношения для расчета ферродинамических датчиков угла поворота — ФДД | 98 |
| 3-10. Расчет магнитно-индукционных датчиков — МИД . . . | 103 |
| 3-11. Расчет магнитоэлектрических систем преобразователей ток — перемещение МЭС | 109 |
| 3-12. Расчет ферродинамических преобразователей ток — перемещение | 113 |
| Литература | 115 |

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации промышленных установок, а также при проведении экспериментальных исследований требуется иметь данные о величинах, характеризующих процессы, происходящие в различных машинах, агрегатах, установках, данные о давлениях, деформациях и напряжениях в различных частях машин и сооружений.

В процессе эксплуатации эти данные используются для контроля работы машин и агрегатов, состояния сооружений, для автоматического регулирования параметров машин и для выполнения других функций, связанных с автоматизацией процессов.

Указанные функции — контроль, регулирование и другие — весьма часто выполняют с использованием электрических величин, пропорциональных требуемым параметрам, так как электрические величины наиболее удобны для построения визуальных и регистрирующих приборов, измерительных элементов регуляторов, для передачи на расстояние. В данном случае измерение неэлектрических величин осуществляется посредством электрических преобразователей.

Имеются различные виды электрических преобразователей неэлектрических величин: ферромагнитные, магнитострикционные, емкостные, пьезоэлектрические, фотоэлектрические, омические, радиоактивные и др.

В данной книге рассматриваются принципы действия и построение электромеханических ферромагнитных датчиков и преобразователей, в которых выходная электрическая величина определяется изменением положения подвижных частей устройства. Такие преобразователи получили наибольшее применение в промышленности, так как они обладают рядом преимуществ по

сравнению с другими видами преобразователей: простой устройства, высокой надежностью, возможностью подключения к источникам промышленной частоты, относительно большой выходной мощностью.

Первичным элементом системы измерения является датчик или первичный преобразователь, устанавливаемый в месте замера параметра. Выход преобразователя в виде напряжения или тока подается на измерительный прибор: визуальный, регистрирующий, на исполнительные устройства — например, реле, автоматические регуляторы, на входы машин централизованного контроля, управляющих машин и т. д.

Электромеханическими преобразователями возможно осуществить преобразование различных механических величин: линейных и угловых перемещений, уровня, скорости и ускорения перемещающихся деталей, деформации деталей параметров, вибраций и других.

С применением дополнительных механических устройств, называемых *чувствительными элементами*, могут быть преобразованы и другие физические величины: давление и разрежение, расход жидкостей и газов, температура и другие.

Ниже приводится для примера краткий перечень устройств, использующих электромеханические преобразователи и выполняющих ряд операций: измерение, автоматическое управление и регулирование, защиту, блокировку и т. п.

а) устройства для измерения перемещений — линейных и угловых;

б) устройства для измерения относительных удлинений, механических напряжений в частях машин и сооружений;

в) устройства для контроля размеров деталей в процессе их обработки;

г) бесконтактные конечные и путевые выключатели, педали для фиксации момента прохождения колеса вагона;

д) электрические манометры, дифманометры, уровнемеры, электрические весы;

е) устройства для измерения скорости вращения;

ж) устройства для измерения параметров вибраций машин и сооружений;

з) измерительные элементы автоматических регуляторов;

и) измерительные устройства станков автоматической балансировки роторов вращающихся машин;

к) устройства обратной связи систем программного управления.

Устройства, служащие для автоматизации производственных процессов, содержат в себе ряд элементов, служащих для измерения параметров процесса, обработки данных измерения для осуществления требуемых функций процесса и силовые исполнительные механизмы для перемещения клапанов, заслонок и других элементов силовой части установки.

В ряде случаев оказывается целесообразным осуществлять измерения и обработку полученных данных электрическими методами, силовые же функции выполнять с помощью гидравлических или пневматических механизмов. В настоящее время широкое распространение получили электрогидравлические и электропневматические автоматические регуляторы. В связи с этим возникает необходимость осуществления в устройстве двух видов преобразования: преобразования неэлектрических величин в электрические и обратного преобразования электрических величин в перемещение для воздействия на управляющие органы гидравлических и пневматических систем: струйные трубки, золотники, пневмореле, игольчатые клапаны и другие; в ряде случаев такие преобразователи применяются при построении компенсационных приборов.

Устройство для преобразования электрической величины в механическую назовем преобразователем ток—перемещение. В некоторых литературных источниках [Л. 8] такие устройства называют обращенными преобразователями.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

В практике применяются разнообразные виды и исполнения электромеханических ферромагнитных датчиков. Выбор отдельных видов и исполнений определяется назначением устройства, условиями конструктивного сочетания датчика с другими элементами измерительного комплекта, а также техническими требованиями в отношении точности, чувствительности и диапазона измерения и условий работы.

В дальнейшем изложении рассматриваются датчики для преобразования неэлектрической величины — перемещения — в электрическую и преобразователи электрического тока в перемещение.

В зависимости от принципа построения устройства различают следующие типы датчиков неэлектрических величин:

1. *Индуктивные* — работа которых определяется изменением индуктивных сопротивлений катушек, получающегося при перемещении подвижной части датчика — якоря.

Различают: *ОИД* — одинарные индуктивные датчики, состоящие из одного неподвижного магнитопровода с катушкой и подвижного якоря, и *ДИД* — дифференциальные индуктивные датчики, состоящие из двух магнитопроводов с отдельными катушками и подвижного якоря.

2. *Дифференциально-трансформаторные датчики* — *ДТД* — работа которых определяется изменением числа

потокоцеплений между двумя системами катушек датчика при перемещении подвижного якоря.

3. *Ферродинамические датчики — ФДД* — основанные на возникновении э. д. с. в подвижной рамке, расположенной в переменном магнитном поле при ее смещении от нейтрали.

4. *Магнитоиндукционные датчики — МИД*, основанные на наведении э. д. с. в катушке при движении ее относительно постоянного магнитного поля.

К преобразователям ток — перемещение относятся:

1) магнитоэлектрические системы (МЭС), применяемые в случаях, когда требуется линейная зависимость величины перемещения X от силы тока I ;

2) ферродинамические системы (ФДС), применяемые в случаях, когда требуется зависимость

$$X = kI^2,$$

3) поляризованные системы (ПС), применяемые в случаях, когда требуется линейная зависимость углового перемещения от тока

$$\varphi = kI.$$

Указанные системы малопригодны для преобразования напряжения в перемещение, так как при неизменном напряжении значение м. д. с. системы зависит от температуры нагрева рабочих катушек.

1-2. ОДИНАРНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ — ОИД

ОИД выполняются в виде устройства, состоящего из магнитопровода с катушкой и подвижного якоря, перемещающегося под действием внешних сил (рис. 1-1, а и б). В цепи катушки включается нагрузка R_H .

Сила тока в нагрузке

$$I = \frac{\dot{U}_c}{Z} = \frac{\dot{U}_c}{(R_K + R_H) + j\omega L},$$

где R_K , R_H — омические сопротивления катушки и нагрузки;

L — индуктивность катушки.

Индуктивность катушки определяется из соотношения

$$L = \frac{\omega^2}{R_\mu} [\text{гН}],$$

где R_μ — магнитное сопротивление для магнитного потока.

В магнитных системах, имеющих воздушные зазоры, падение магнитного потенциала в стали во много раз

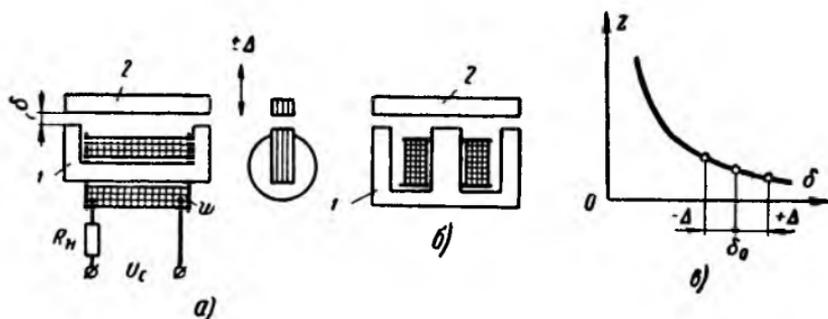


Рис. 1-1. Одинарные индуктивные датчики.

a — П-образный магнитопровод; *б* — Ш-образный; 1 — магнитопровод; 2 — якорь; δ — характеристика $z=f(\delta)$.

меньше падения потенциала в зазорах. Практически при средней длине магнитной линии в стали l_c и суммарной длине зазоров 2δ при условии, что

$$200 \delta < l_c,$$

пренебрегают падением магнитного потенциала в стали. При расчетах обычно пользуются магнитной проводимостью воздушных зазоров G , величиной, обратной R_μ , и индуктивность катушки определяют из соотношения

$$L = \omega^2 G [\text{гН}].$$

Величина G зависит от площади полюса S и длины зазора:

$$G = \mu_0 \frac{S}{2\delta},$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Таким образом, с изменением длины зазора при перемещении якоря относительно магнитопровода изменяется индуктивность катушки, а следовательно, и ток в нагрузке.

Зависимость полного сопротивления катушки от зазора $z=f(\delta)$ приведена на рис. 1-1,в.

ОИД обладают рядом недостатков:

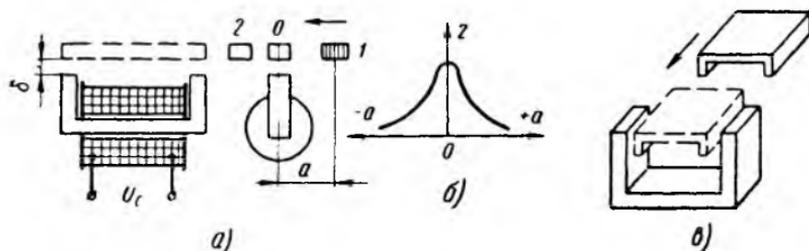


Рис. 1-2. Одинарные индуктивные датчики для концевых и путевых выключателей:

a — с поперечным движением якоря; b — характеристика; c — с продольным движением якоря.

а) сила тока в катушке изменяется при колебаниях напряжения и частоты сети;

б) на кривой $z=f(\delta)$ можно выделить лишь небольшой участок $2\Delta \ll 0,1 \delta_0$ с приближенной линейной характеристикой;

в) на якоре датчика возникают значительные силы, определяемые потоком Φ_p магнитной системы в рабочих зазорах между полюсами и якорем. Эти силы, действуя на контролируемую деталь, перемещение которой передается якору, могут изменить положение детали, что вносит искажения в измерения. Указанные недостатки ограничивают область применения ОИД.

В практике такие датчики используются обычно в случаях, когда требуется ступенчатое, релейное действие исполнительного устройства, например реле, включенного в цепи катушки датчика. В этих случаях выполняют датчик так, чтобы якорь перемещался не в плоскости магнитопровода (рис. 1-1,а), а параллельно этой плоскости (рис. 1-2,а).

Характеристика $z=f(a)$, где a — перемещение якоря, изображена на рис. 1-2,б: при совпадении положения якоря и магнитопровода (положение 0) получается наи-

большее значение z . Оно резко снижается при удалении якоря (положения 1 и 2).

Имеются конструкции ОИД, в которых якорь при своем перемещении входит в зону полюсов (рис. 1-2, в).

На рис. 1-3 показана конструкция ОИД, предназначенного для устройств, где контролируемая деталь,

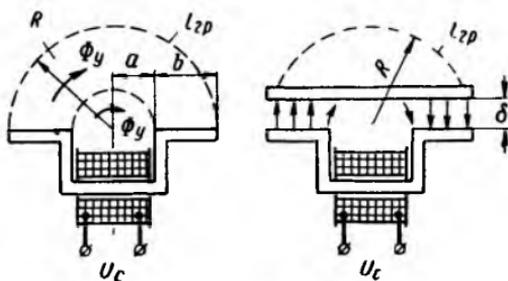


Рис. 1-3. ОИД с удлиненными полюсами.

играющая роль якоря датчика, должна проходить на большом расстоянии от магнитопровода ($\delta = 80 \div 100$ мм). Полюса магнитопровода выполняют удлиненными, с таким расчетом, чтобы возможно большая часть магнитного потока проходила через якорь. В магнитопроводах с обычной формой полюсов при прохождении якоря над полюсами на большом расстоянии проводимость системы изменяется незначительно.

При отсутствии якоря индуктивность катушки определяется магнитной проводимостью рассеяния G_y . Ориентировочно длину граничной силовой линии потока рассеяния принимают равной

$$l_{гр} = \pi R = \pi(a + b).$$

Для того чтобы наличие якоря влияло на величину общей проводимости магнитной системы, необходимо увеличивать размер b полюса, с тем чтобы выполнялось условие

$$2\delta < l_{гр}.$$

ОИД релейного действия применяют в целом ряде устройств: в качестве бесконтактных датчиков положения, концевых выключателей вспомогательных механиз-

мов прокатных станов, тележек (при прохождении стальной оси тележки над магнитопроводом срабатывает реле), в качестве датчиков положения кабин лифтов и т. п.

1-3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ—ДИД

ДИД выполняются в виде системы, состоящей из двух магнитопроводов с общим якорем и двумя катушками.

По форме магнитной системы различают ДИД: плоские — с магнитопроводом плоской формы, набранным из листов электротехнической стали, и цилиндрические — со сплошным магнитопроводом круглого сечения. Выбор той или другой формы определяется конструктивными условиями сочетания датчика и контролируемого устройства.

Плоские ДИД — рис. 1-4, а. При среднем положении якоря на одинаковом расстоянии от обоих магнитопроводов воздушные зазоры равны, т. е.

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_0.$$

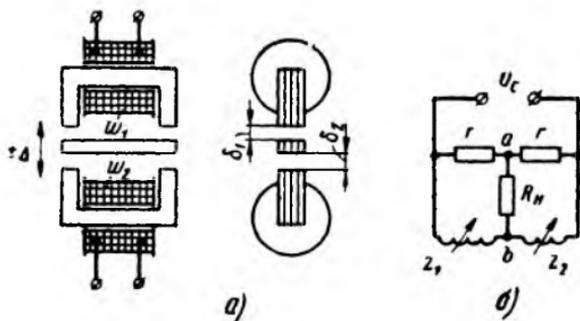


Рис. 1-4. Дифференциальный индуктивный датчик.

а — магнитная система; б — схема включения.

Магнитные проводимости системы и индуктивности катушек ω_1 и ω_2 равны друг другу. При смещении якоря на величину Δ , например вверх, увеличивается проводимость, а следовательно, и индуктивность верхнего магнитопровода и уменьшается нижнего:

$$L_1 = \omega_1^2 G_1; L_2 = \omega_2^2 G_2; L_1 > L_2.$$

Обе катушки включаются в мостовую схему (рис. 1-4, б), два других плеча моста выполняются в виде омических сопротивлений r . При равенстве рабочих зазоров ($\delta_1 = \delta_2$) мост находится в равновесном состоянии и разность потенциалов между точками a и b равна нулю. При смещении якоря от нейтрали появляется

выходное напряжение U_{ab} и в нагрузке R_H протекает ток. Фаза выходного напряжения изменяется на 180° при прохождении якорем нейтрального положения.

Цилиндрические датчики (рис. 1-5). Магнитопровод датчика выполняется в виде цилиндрической трубки, играющей роль ярма с двумя крышками, якорь также имеет цилиндрическую форму. Для увеличения проводимости между наружным ярмом и якорем посередине цилиндра (на линии MN) устанавливается диск из ферромагнитного материала. Катушки датчика — ω_1 и ω_2 — расположены по обе стороны диска. Как правило, датчик выполняется так, что $\omega_1 = \omega_2$.

Индуктивность каждой из катушек определяется магнитной проводимостью для потоков: Φ_1 —

в верхней части магнитопровода и Φ_2 — в нижней. Каждый из этих потоков состоит из двух частей: Φ_0 , замыкающийся по торцам якоря к крышкам цилиндра, и Φ_y , замыкающийся по периметру якоря к периметру цилиндра:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} + \Phi_{y1}; \quad \Phi_2 = \Phi_{02} + \Phi_{y2}.$$

Магнитные проводимости системы:

$$G_1 = G_{01} + G_{y1}; \quad G_2 = G_{02} + G_{y2}.$$

При симметричном расположении якоря в магнитопроводе магнитные проводимости обеих частей системы равны друг другу:

$$G_1 = G_2.$$

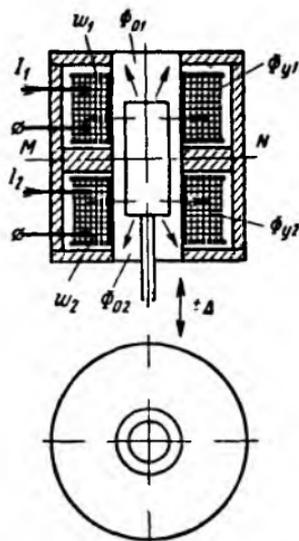


Рис. 1-5. Дифференциальный индуктивный датчик цилиндрической формы.

При смещении якоря, например, вверх увеличивается значение G_1 и уменьшается значение G_2 .

Индуктивности катушек

$$L_1 = \omega_1^2 G_1; \quad L_2 = \omega_2^2 G_2$$

также изменяются.

На рис. 1-6 приведены характеристики ДИД:

$$z_1(\Delta); \quad z_2(\Delta); \\ \Delta z = z_1 - z_2 = f_3(\Delta),$$

где Δ — смещение якоря от среднего положения.

По сравнению с ОИД дифференциальные датчики обладают некоторыми преимуществами: линейная часть характеристики Δz получается на большем участке, уменьшается электро-механическая сила на якоре, так как в дифференциальных системах она является разностью сил притяжения якоря к первому и второму магнитопроводам. Выходное напряжение схемы U_{ab} (рис. 1-4) зависит от напряжения и частоты сети меньше, чем в ОИД; в частности, нулевая точка характеристики (при среднем положении якоря) не смещается при колебаниях напряжения.

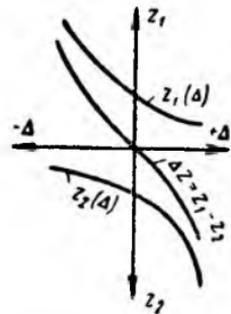


Рис. 1-6. Характеристики ДИД.

1-4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ — ДТД

ДТД представляют собой два совмещенных трансформатора с общим подвижным якорем. По форме магнитной системы различают: плоские ДТД с магнитопроводом плоской формы и цилиндрические ДТД с магнитопроводом круглого сечения. Выбор той или иной формы определяется конструктивными условиями сочетания датчика и контролируемого устройства.

Плоские ДТД. В практике применяются разнообразные исполнения таких датчиков: с двумя отдельными магнитопроводами и общим якорем (рис. 1-7, а, 1-8, а и б), с общим магнитопроводом и общим якорем

(рис. 1-7,б и 1-8,в и г) и общим магнитопроводом и двумя якорями (рис. 1-8,д).

ДТД — с двумя раздельными магнитопроводами. Каждый из магнитопроводов датчика (рис. 1-7,а) снабжается первичной w_1 и вторичной w_2 катушками. Обе первичные катушки имеют одинаковые числа витков,

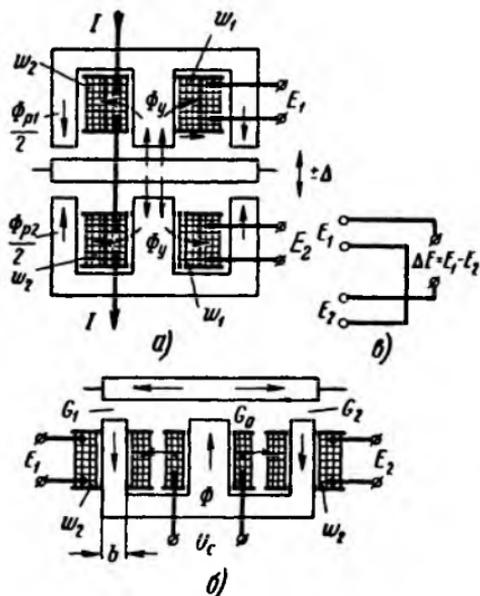


Рис. 1-7. Дифференциальные трансформаторные датчики ДТД.

а — с раздельными первичными катушками; б — с общей первичной катушкой.

включаются последовательно и обтекаются общим током I , создающим в каждой из обмоток м. д. с. Iw_1 . Магнитный поток в каждом магнитопроводе складывается из двух частей: Φ_y — рассеяния между полюсами, и Φ_p — рабочих потоков между полюсами и якорем (Φ_{p1} и Φ_{p2}).

Величина Φ_y одинакова для обоих магнитопроводов и не изменяется с изменением положения якоря. Величины рабочих потоков зависят от м. д. с. первичной обмотки Iw_1 и магнитной проводимости между полюсом и якорем:

$$\Phi_{p1} = \sqrt{2} I w_1 G_1; \quad \Phi_{p2} = \sqrt{2} I w_1 G_2; \quad \Phi_y = \sqrt{2} I w_1 G_y.$$

Во вторичных обмотках наводятся э. д. с.:

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \omega_2 (\Phi_{p1} + \Phi_y) = \frac{\omega}{\sqrt{2}} I \omega_1 \omega_2 (G_1 + G_y);$$

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} I \omega_1 \omega_2 (G_2 + G_y).$$

Нейтральному положению якоря соответствует равенство зазоров и магнитных проводимостей, а следовательно, и равенство значений э. д. с.:

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_0; \quad G_1 = G_2 = G_0; \quad \Phi_{p1} = \Phi_{p2}; \quad E_1 = E_2.$$

При смещении якоря от нейтрали на величину Δ изменяются все данные системы. Например, при смещении якоря вверх:

$$\delta_1 = \delta_0 - \Delta; \quad \delta_2 = \delta_0 + \Delta; \quad G_1 = G_0 + \Delta G_1; \quad G_2 = G_0 - \Delta G_2.$$

В результате:

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} I \omega_1 \omega_2 (G_0 + \Delta G_1 + G_y);$$

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} I \omega_1 \omega_2 (G_0 - \Delta G_2 + G_y).$$

В определенных пределах смещения якоря от нейтрали изменение проводимостей рабочих зазоров пропорционально Δ :

$$\Delta G_1 = \Delta G_2 = k \Delta.$$

В большинстве схем с применением ДТД вторичные обмотки включаются встречно (см. рис. 1-7, в). В этом случае выходное значение э. д. с. равно:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \sqrt{2} \omega I \omega_1 \omega_2 k \Delta.$$

Фаза ΔE изменяется на 180° при смещении якоря в другую сторону от нейтрального положения.

ДТД с общим магнитопроводом (рис. 1-7, б). На среднем сердечнике насаживается первичная катушка, на крайних — вторичные. В такой конструкции магнитный поток, определяемый первичной катушкой, разветвляется вправо и влево, пропорционально магнитным проводимостям левой и правой частей магнитопровода. В нейтральном симметричном положении якоря эти проводимости G_1 и G_2 равны друг другу и, следовательно, равны значения э. д. с. обеих вторичных катушек:

$$E_1 = E_2.$$

При смещении якоря влево или вправо изменяются значения G_1 и G_2 , соответственно изменяются потоки Φ_{p1} и Φ_{p2} , а следовательно, и э. д. с. E_1 и E_2 .

Разные формы магнитных систем плоских дифференциально-трансформаторных датчиков приведены на рис. 1-8.

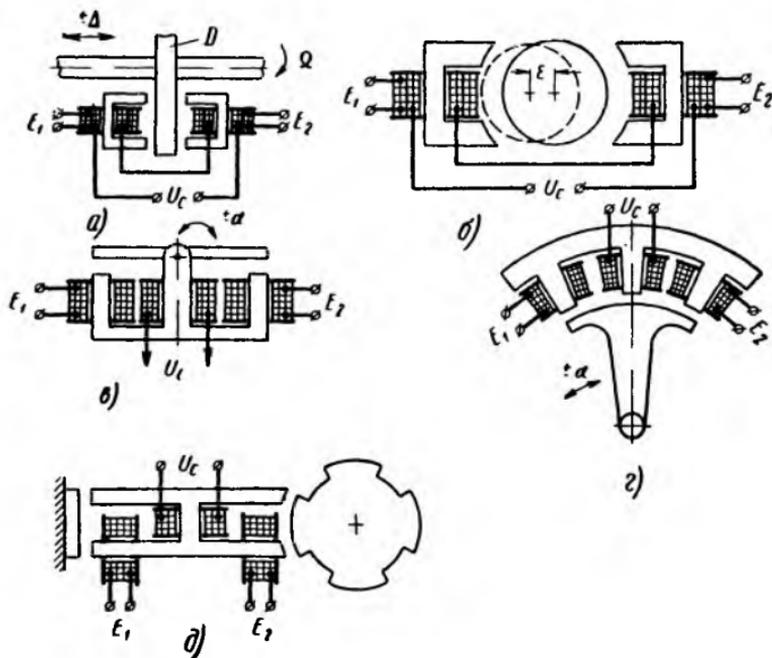


Рис. 1-8. Примеры выполнения плоских ДТД.

Цилиндрические ДТД выполняются двух видов — с сосредоточенной обмоткой и с распределенной. Схема датчика с сосредоточенной первичной обмоткой приведена на рис. 1-9,а. На общем изоляционном каркасе размещены три катушки: первичная ω_1 и две вторичные ω_2 с одинаковыми числами витков. Внутри катушек перемещается подвижный якорь, связанный с соответствующим контролируемым механизмом. Снаружи катушки охватываются круглым магнитопроводом.

На рис. 1-9,б показана схема ДТД с распределенной первичной обмоткой. На общем изоляционном каркасе расположены: первичная катушка ω_1 , состоящая из двух последовательно включенных катушек, и две вто-

ричные ω_2 , расположенные по обе стороны от средней линии MN . Снаружи каркас охватывается цилиндрическим магнитопроводом из листовой электротехнической стали.

Магнитный поток, создаваемый первичной катушкой, состоит из общего потока Φ_0 , охватывающего обе вто-

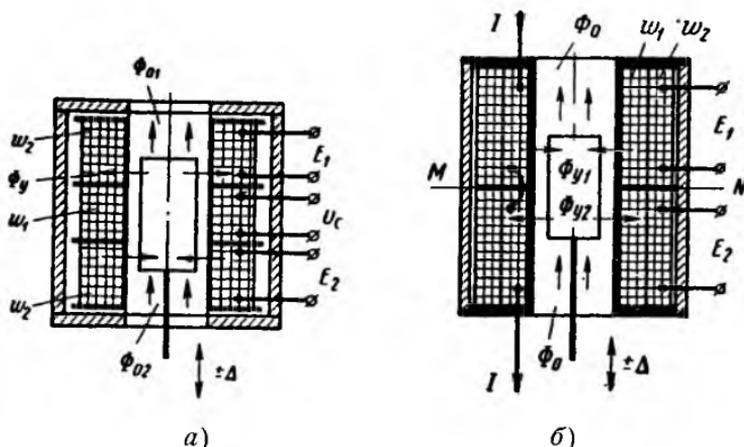


Рис. 1-9. Цилиндрические дифференциально-трансформаторные датчики.

a — с сосредоточенной первичной обмоткой; *б* — с распределенной.

ричные катушки, и частных потоков: Φ_{y1} , охватывающего верхнюю, и Φ_{y2} — нижнюю катушку. Наведенные в обмотках э. д. с.:

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \omega_2 (\Phi_0 + \Phi_{y1}); \quad E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} (\Phi_0 + \Phi_{y2}).$$

При симметричном относительно вторичных катушек положении якоря потоки Φ_{y1} и Φ_{y2} равны друг другу, а следовательно, равны и значения наведенных в них э. д. с. При смещении якоря, например вверх, на величину Δ увеличивается значение Φ_{y1} и уменьшается Φ_{y2} . В этом случае $E_1 > E_2$. При встречном включении катушек выходная величина равна разности э. д. с.:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \sqrt{2} \omega I \omega_1 \omega_2 k \Delta.$$

Применение ДТД. ДТД, наряду с дифференциальными индуктивными датчиками, являются одними из самых распространенных элементов устройств измерения

неэлектрических величин. Посредством ДТД решается ряд задач измерения с высокой чувствительностью и точностью.

Могут быть отмечены следующие положительные качества ДТД:

а) вторичные обмотки датчика могут быть выполнены с большим числом витков, благодаря чему может быть получена высокая чувствительность. Высокое выходное сопротивление датчика хорошо согласуется с входом электронного усилителя. Применение последних позволяет измерять весьма малые перемещения — до нескольких микрон;

б) ДТД является весьма удобным элементом для построения компенсационных измерительных комплектов (см. § 2-9). При компенсационном методе измерения погрешности, определяемые колебаниями напряжения и частоты сети, а также температурными колебаниями, получаются незначительными и общая погрешность измерения не превышает 1%;

в) в цилиндрических датчиках электромагнитная сила, развиваемая на якоре при его смещении от нейтрали, невелика — от одного до нескольких граммов. Поэтому такие датчики наиболее приемлемы для построения устройств, где требуется механическая связь якоря с чувствительной мембраной.

Ниже приводится несколько примеров применения ДТД.

Датчик рис. 1-7,а применяется для измерения линейных перемещений в пределах от сотых долей миллиметра до трех-четырех миллиметров. При соответствующем конструктивном оформлении датчик позволяет измерять с высокой степенью точности линейные перемещения до нескольких десятков миллиметров (см. § 2-11).

Датчик рис. 1-8,а применяется для измерения осевого смещения вращающихся частей машин, например осевого смещения роторов паровых турбин по отношению к корпусу. На валу турбины насаживается диск, играющий роль якоря, магнитопровод укрепляется на корпусе.

Для измерения эксцентриситета ε вращающихся валов крупных машин применяется система рис. 1-8,б: при $\varepsilon \neq 0$ магнитные проводимости для обеих частей датчика получаются неодинаковыми, и при вращении вала на

выходе получается переменное напряжение, модулированное частотой, определяемой скоростью вращения.

Датчик (рис. 1-8,б) применяется для измерения небольших угловых перемещений.

ДТД может быть исполнен в виде поворотного трансформатора (рис. 1-8,г), в котором при повороте оси на выходе двух встречно включенных вторичных катушек появляется э. д. с. ΔE , пропорциональная углу поворота α . Такие датчики нашли применение в следящих приводах.

На рис. 1-8,д показано устройство бесконтактного переключателя. Датчик имеет два якоря: левый, укрепленный жестко, и правый, выполненный в виде зубчатого диска. Если зубец диска расположен против полюсов, то э. д. с. на выходе обеих встречно включенных вторичных катушек равна нулю; при отходе зубца от полюсов на выходе появляется напряжение, равное разности э. д. с. обеих катушек, которое после усиления подается на реле.

ДТД применяют также для измерения механических напряжений в частях машин и сооружений. Напряжения, возникающие при наличии сил сжатия, изгиба или кручения, определяются по величине деформации. Обычно проводят исследования для получения картины распределения напряжения по всей поверхности детали. Важно поэтому выполнить измерительное устройство так, чтобы было возможно измерять напряжение на минимальном участке детали. Длину участка называют *базой измерения*. Широко применяемые в настоящее время проволочные тензометры обладают достаточной чувствительностью при величине базы от 10 мм и выше. Тензометры, построенные с применением ДТД, обладают рядом преимуществ по сравнению с проволочными: возможность многократного применения одного и того же преобразователя, возможность непосредственной тарировки преобразователя, более простая схема измерения, меньшее влияние температуры и влажности, возможность выполнения с малой базой измерения (порядка 1,5—2 мм). Тензометр с базой измерения, равной 2 мм, конструкции А. П. Молчанова описан в [Л. 8].

Пример электрического тензометра с большой базой применяемого для измерения давления валков прокатных станов, передаваемого корпусу, показан на

рис. 1-10,а. На корпусе в точке A укрепляется ДТД, в точке B — штанга из немагнитного материала с якорем на конце. Якорь установлен в магнитной системе так, что он находится в нейтральном положении при давлении валков, равном нулю. В одной из конструкций при средних значениях давления валков и базисной длине $L=400$ мм деформация корпуса, а следовательно, и перемещение штанги с якорем составляет 20 мк.

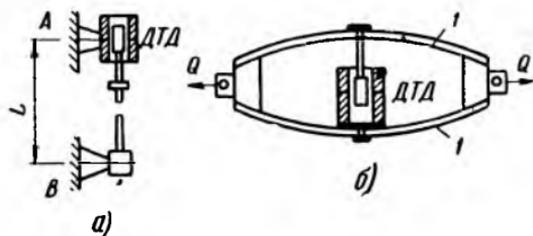


Рис. 1-10. Схема электрических динамометра и тензометра.

ДТД используются в электрических динамометрах, применяемых для измерения сил сжатия и растяжения твердых тел. На рис. 1-10,б приведен эскиз электродинамометра, предназначенного для измерения и регистрации сил растяжения в разных устройствах. В двух вкладышах укреплены рессоры I , на нижней из них укреплена магнитная система, на верхней — якорь. При силе растяжения, равной нулю, якорь располагается в нейтрали магнитной системы, при наличии силы якорь смещается от нейтрали.

Большое распространение получили ДТД при построении электрических манометров, расходомеров, напорометров, уровнемеров и других измерителей технологических величин.

1-5. ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ — ФДД

ФДД выполняются аналогично ферродинамическим измерительным приборам и состоят из неподвижного магнитопровода с обмоткой, поворотной рамки с числом витков ω_p и сердечника (рис. 1-11). Катушка возбуждения ω_1 создает магнитное поле, индукция которого B равномерна в зоне полюсов (в пределах угла θ). Если

рамка расположена в нейтральной (линия NN), наведенная в ней э. д. с. равна нулю, так как магнитные линии не пересекают витков рамки. При повороте на угол α в рамке индуцируется э. д. с.

$$E_p = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Psi = 2 \frac{\omega}{\sqrt{2}} B_p b \omega_p R_p \alpha;$$

здесь Ψ — потокосцепление рамки;
 B_p — амплитудное значение индукции в зазоре;
 b — активная длина провода рамки, пересекаемого полем;
 R_p — средний радиус рамки;
 ω_p — число витков рамки,
 α — угол поворота рамки, рад.

При постоянных значениях ω и напряжении U_c

$$E_p = k\alpha,$$

т. е. наведенная в рамке э. д. с. пропорциональна углу поворота α . Фаза E_p меняется на 180° при повороте рамки вверх или вниз от нейтральной.

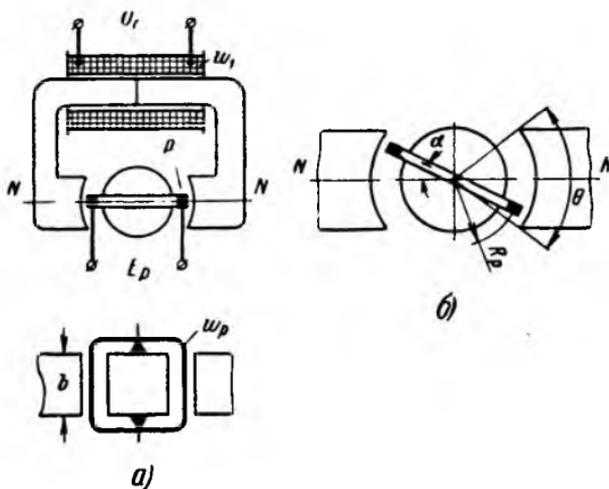


Рис. 1-11. Ферродинамический датчик угла поворота ФДД.

Рабочий угол α , т. е. максимальный поворот рамки от нейтральной, допускаемый из условия линейности преобразования, составляет обычно $\pm 20^\circ$.

1-6. МАГНИТОИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ — МИД

МИД выполняются в виде магнитной системы с постоянным магнитом, в поле которого располагается катушка. При изменении величины поля магнита или при взаимном перемещении магнита и катушки в последней наводится э. д. с., пропорциональная скорости изменения поля или скорости движения.

МИД применяются для измерения скоростей, ускорений и параметров вибраций частей машин и механизмов. По принципу действия и связанному с этим конструктивному исполнению различают два основных вида МИД: устройства с изменяющейся величиной поля магнита и устройства со взаимным перемещением магнита и катушки.

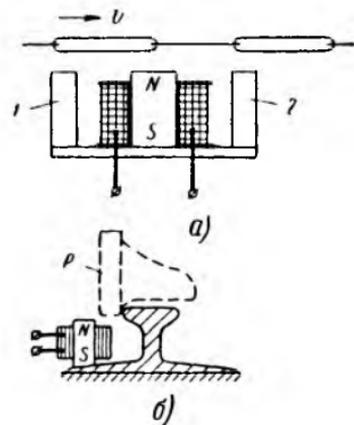


Рис. 1-12. Принцип действия магнитоиндукционных датчиков — МИД.

Устройства с изменяющейся величиной поля постоянно-го магнита. Магнитная система с постоянным магнитом имеет воздушные зазоры (рис. 1-12,а). При прохождении в этих зазорах детали из ферромагнитного материала меняется проводимость зазоров, а следовательно, и величина потока постоянно-го магнита. В катушке, связанной с полем магнита, наводится э. д. с.

$$E = \omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

Здесь ω — число витков катушки.

В процессе перемещения детали, выполненной из ферромагнитного материала, изменяются магнитные проводимости зазоров: полюс магнита — полюс 1 (G_1) и полюс магнита — полюс 2 (G_2).

В момент, когда деталь расположена так, как это изображено на рис. 1-12,а, G_1 имеет максимальное значение, а G_2 — минимальное. По мере продвижения детали вправо значение G_1 уменьшается, а G_2 увеличивается. Соответственно изменяется и поток постоянного

магнита. Скорость этого изменения определяется скоростью движения детали. В катушке наводится э. д. с. переменного знака, форма кривой э. д. с. близка к синусоидальной. Выход катушки включается через выпрямительный мост на измерительный прибор постоянного тока или реле, обладающее высокой чувствительностью, например поляризованное. В некоторых случаях добавляют промежуточные усилители.

Рассматриваемые МИД применяются для контроля скорости движения частей машин и механизмов.

При нормальном режиме работы конвейеров, лебедок и других устройств их детали перемещаются с определенной скоростью; при возникновении аварийного режима, характеризующегося резким уменьшением скорости или остановкой механизма, датчик должен послать импульс в цепи сигнализации, управления и блокировки. Для этой цели применяют соответствующие устройства: центробежные механизмы, тахогенераторы и другие, непосредственно связанные с частями машин и механизмов. В тех случаях, когда нельзя осуществить механическую связь между частями датчика и защищаемой машины или механизма, применяют МИД. При этом подвижные элементы машины должны быть выполнены так, чтобы движущиеся над магнитом детали состояли из отдельных отрезков ферромагнитных материалов (рис. 1-12,а). Таким путем обеспечивается периодическое изменение магнитной проводимости цепи постоянного магнита.

МИД применяются на железнодорожном транспорте в качестве бесконтактных педалей и служат для фиксации прохождения осей вагонов. На рис. 1-12,б приведен эскиз педали. У рельсового пути устанавливается постоянный магнит с надетой на него катушкой. Когда на данном участке пути нет вагона, магнитная проводимость системы «магнит — рельс» невелика; она резко увеличивается при прохождении реборды колеса вагона; соответственно изменяется и поле магнита; причем скорость этого изменения пропорциональна скорости движения вагона.

Устройства со взаимным перемещением магнита и катушки применяются в основном для преобразования механических колебаний в электрические.

Простейшая конструкция датчика аналогична вы-

полнению магнитоэлектрических громкоговорителей (рис. 1-13). Магнитопровод 2 с постоянным магнитом 1 укрепляется неподвижно, рамка 3 с числом витков w соединяется с вибрирующей частью машины. В витках

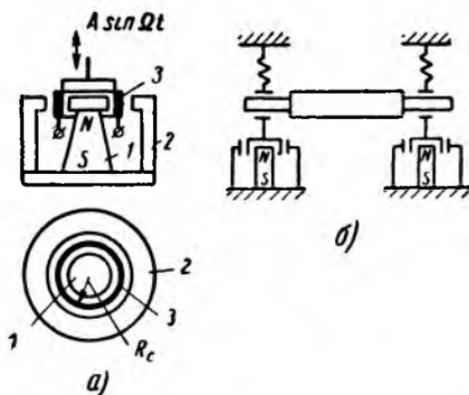


Рис. 1-13. Эскиз магнитоиндукционного датчика (а) и пример его применения (б).

рамки, пересекающей при механических колебаниях линии поля постоянного магнита, наводится э. д. с. по закону

$$E = Bl_p w v \sin \alpha [\text{в}],$$

где B — магнитная индукция поля магнита, тл;

l_p — средняя длина витка рамки, м;

$v = dx/dt$ — относительная скорость колебательного смещения;

α — угол между направлением движения и вектором магнитной индукции.

Практически устройства выполняют так, что

$$\alpha = 90^\circ, \quad \sin \alpha = 1.$$

Величина E характеризует скорость вибрационного смещения. Для измерения величины смещения необходимо интегрировать значение E , для чего между катушкой преобразователя и вторичным измерительным прибором включают интегрирующий RC -контур. Выходное напряжение этого контура подается на ламповый вольт-

метр или промежуточный усилитель (см. гл. 3). Описанная конструкция виброметра применяется в случаях, когда возможно разделить базы крепления магнитопровода, который остается неподвижным от базы вибрирующей части машины. Так, например, в станках для автоматической балансировки роторов машин рамка преобразователя связана с упруго подвешенными подшипниками станка, а магнитопровод жестко укреплен на корпусе станка (рис. 1-13,б).

В ряде конструкций машин такое разделение баз крепления трудно осуществимо, а весь датчик в целом приходится укреплять на вибрирующей части машины, например на подшипнике, вибрации которого требуется измерять. В таких случаях виброметры выполняются в виде сейсмических устройств. Термин «сейсмический» принят потому, что аналогичные конструкции впервые применены в сейсмометрии. Датчик состоит из двух основных частей: корпуса, жестко укрепленного на вибрирующей части машины, и сейсмической массы, сочлененной с корпусом посредством пружин. Роль сейсмической массы обычно играет в таких конструкциях постоянный магнит (рис. 1-14).

Собственная частота этой массы

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (1-1)$$

где c — жесткость пружины, n/m ;

m — масса всех частей, связанных с постоянным магнитом, кг.

При достаточно большом значении массы, малых жесткостях пружин и высокой частоте f измеряемых ко-

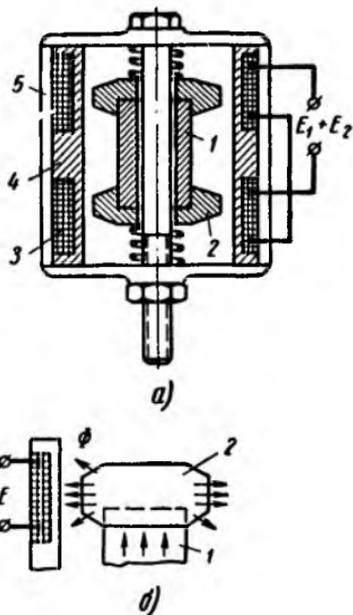


Рис. 1-14. Виброметр с магнитоиндукционным датчиком.

лебаний можно считать, что масса остается неподвижной относительно земли, так как собственная частота f_c ее относительно невелика. Тогда перемещение вибрирующего вместе с исследуемой машиной корпуса датчика относительно сейсмической массы воспроизводит измеряемое перемещение. При проектировании виброме-

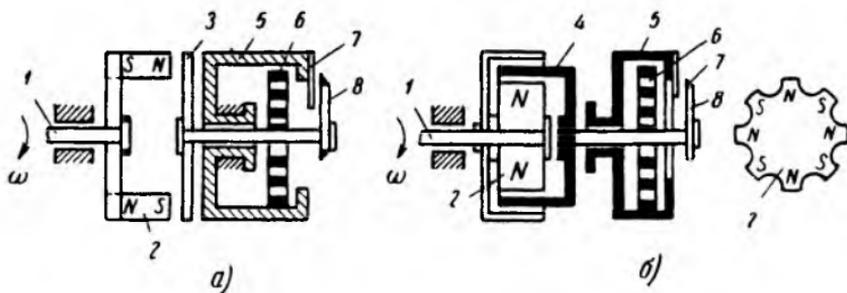


Рис. 1-15. Принцип построения тахометров.

a — тахометр с диском; *б* — с барабаном; 1 — ось вращения; 2 — постоянный магнит; 3 — диск; 4 — барабан; 5 — корпус; 6 — спиральная пружина; 7 — шкала; 8 — стрелка.

тров требуется учитывать условие: собственная частота сейсмической массы должна быть в несколько раз меньше частоты колебаний исследуемой системы. Так, например, при измерении колебаний подшипников паровых турбин с частотой от 25 до 75 *гц* собственная частота сейсмической массы принимается порядка 6—9 *гц*.

На рис. 1-14 приведена конструкция магнитоиндукционного виброметра. Постоянный магнит 1 и жестко связанные с ним полюсные башмаки 2 упруго закреплены с предварительным натягом на цилиндрических пружинах так, что они могут перемещаться вдоль оси. Каркас 4 с двумя обмотками ω укреплен в магнитопроводе 5. Весь механизм жестко укрепляется к исследуемому объекту. При наличии вибрации корпус, а с ним и катушки следят за перемещением вибрирующего тела; постоянный магнит остается в покое. При этом в обеих катушках наводятся э. д. с. разных знаков от разных полюсов магнита. Обе обмотки включаются встречно, и величины их э. д. с. суммируются. Выход датчика подается на интегрирующий контур, а затем на электронный измерительный прибор.

Системы со взаимным перемещением магнита и катушки применяются также при построении тахометров —

приборов для измерения скоростей вращения машин и механизмов. В этих приборах роль катушки играют диски или барабанчики из меди и алюминия. На рис. 1-15,а приведена схема тахометра с диском. На валу машины укреплены постоянные магниты. В поле вращающихся магнитов находится диск из меди или алюминия, на оси его закреплен один конец спиральной пружины, другой конец которой закреплен в корпусе прибора. При вращении магнита против каждого его полюса в диске наводится э. д. с. резания:

$$E_p = Bbv \text{ [в]}, \quad (1-2)$$

где B — магнитная индукция поля магнита, тл;

$$v = \Omega R_1, \quad (1-3)$$

где Ω — угловая скорость, рад/сек;

R_1 — расстояние от центра диска до центра полюса, м;

b — радиальный размер полюса, м.

При наличии э. д. с. резания E_p в диске возникают кольца токов резания:

$$I_p = \frac{E_p}{r_p}, \quad (1-4)$$

где r_p — омическое сопротивление колец токов резания.

Сила взаимодействия между полем одного полюса и током резания

$$Q_1 = 0,102BI_p b \text{ [кгс]}. \quad (1-5)$$

Момент на диске, создаваемый n полюсами магнита на радиусе R_1 равен:

$$M_d = nQ_1 R_1. \quad (1-6)$$

Из (1-1) — (1-6) имеем:

$$M_d = 0,102 \frac{nB^2 b^2 R_1^2}{r_p} \Omega = k_d \Omega.$$

Значение противодействующего момента спиральной пружины при закручивании ее на угол φ

$$M_{\text{п}} = \frac{EJ_z}{L} \varphi = k_{\text{п}} \varphi,$$

где E — модуль упругости первого рода;

J_z — момент сопротивления;

L — длина спирали.

В равновесном положении устройства $M_{\text{д}} = M_{\text{п}}$, следовательно,

$$\varphi = \frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{п}}} \Omega = k \Omega.$$

Таким образом, угол закручивания пружины, т. е. угол поворота диска и связанной с ним стрелки, пропорционален угловой скорости или числу оборотов в минуту вращающегося вала машины.

Имеются выполнения тахометров с барабаном (см. рис. 1-15,б); принцип действия таких устройств аналогичен принципу действия тахометров с диском.

Показания тахометра зависят от температуры окружающей среды, изменение которой влияет на значения B , L , r_p .

При колебаниях температуры в пределах $-20 \div +50^\circ \text{C}$ основная ошибка определяется изменением удельного сопротивления материала диска. В этом случае температурная компенсация осуществляется применением шунтов из термомагнитных материалов с низкой точкой Кюри.

1-7. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОК — ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Назначением преобразователя ток — перемещение является преобразование электрического тока в пропорциональное ему перемещение частей механизмов, например золотников, мембран, клапанов и других. Непосредственно в преобразователе создаются механические силы и моменты, и благодаря упругой связи между преобразователем и приводимой деталью получают пропорциональные этим силам или моментам перемещения.

Ниже рассмотрены основные виды преобразователей ток — перемещение.

Магнитоэлектрические системы (МЭС). Конструкция устройства идентична конструкции магнитоиндукционных датчиков (см. рис. 1-13).

На рис. 1-16,а показана для примера схема электропневматического преобразователя давления с элементом типа «сопло — заслонка». Давление p из воздушной сети через редуктор подается на преобразователь и далее в пневматическую машину M . Давление на выходе регулируется током I , подаваемым в рамку, расположенную в поле постоянного магнита 1 . Сила, действующая на рамку, преодолевает силу реакции пружинной мембраны 2 и перемещает заслонку 4 . При определенном значении тока I устанавливается соответствующее расстояние между соплом 3 и заслонкой 4 , давление p_1 в трубе становится меньше подведенного из-за выхлопа воздуха во внешнее пространство B . При увеличении силы тока расстояние между деталями 4 и 3 уменьшается и давление p_1 увеличивается. Более совершенная конструкция электропневматического преобразователя рассмотрена в гл. 3.

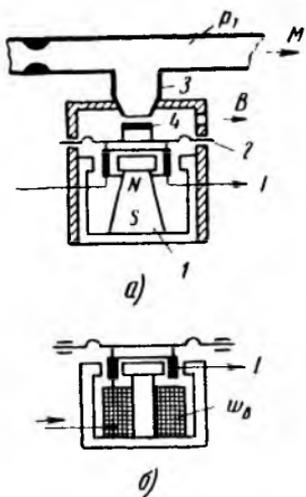


Рис. 1-16. Электромеханические преобразователи.

a — магнитоэлектрический преобразователь ток — давление воздуха; $б$ — ферродинамический преобразователь ток — перемещение.

Сила, развиваемая на рамке,

$$Q_3 = 0,102 B_p l_p I \omega_p \text{ [кгс]}, \quad (1-7)$$

где B_p — индукция в рабочем зазоре, определяемая полем постоянного магнита;

I — сила тока в рамке.

Деформация X мембраны при жесткости последней, равной c

$$X = c Q_m. \quad (1-8)$$

В равновесном состоянии

$$Q_3 = Q_m. \quad (1-9)$$

Из (1-7)—(1-9), учитывая постоянное значение B_p , получаем:

$$X = k_1 I.$$

Ферродинамические системы (ФДС). Ферродинамические системы (рис. 1-16,б) выполняются как и магнитоэлектрические, но с заменой постоянного магнита катушкой возбуждения, подключенной к источнику тока последовательно с рамкой.

Индукция в рабочем зазоре пропорциональна м. д. с. катушки возбуждения:

$$B_p = k_2 I \omega_p = k_0 I. \quad (1-10)$$

Тогда из (1-7) и (1-10)

$$Q_p = 0,102 k_0 I^2 l_p \omega_p. \quad (1-11)$$

С учетом (1-8) и (1-11) получаем:

$$X = k_2 I^2.$$

Поляризованные системы (ПС). Действие поляризованных систем определяется наличием двух магнитных потоков: постоянного по величине и знаку, называемого поляризующим, и рабочего, величина и полярность которого зависят от силы тока в рабочей катушке. В качестве источника поляризующего потока могут быть приняты постоянный магнит или поляризующая катушка, включенная на постоянный источник напряжения.

Поляризованная система может быть выполнена так, что при отсутствии тока в рабочей катушке якорь устанавливается в нейтральном положении силами, развиваемыми поляризующим полем, т. е. в системе действует не механическая пружина, а магнитная. Может быть достигнут также плавный поворот якоря на угол, пропорциональный силе тока в рабочей катушке.

Рассмотрим примеры построения поляризованных систем, применяемых в качестве исполнительных устройств.

На рис. 1-17,а приведена конструктивная схема устройства, применяемого при малых углах поворота ($1 \div 2^\circ$).

Поляризующее поле создается катушкой ω_p , включенной на постоянный источник напряжения. При обес-

точных рабочих катушках ω_p якорь устанавливается в нейтральном положении силами, развиваемыми поляризирующим полем.

При включении рабочей катушки якорь поворачивается по часовой стрелке или против нее, в зависимо-

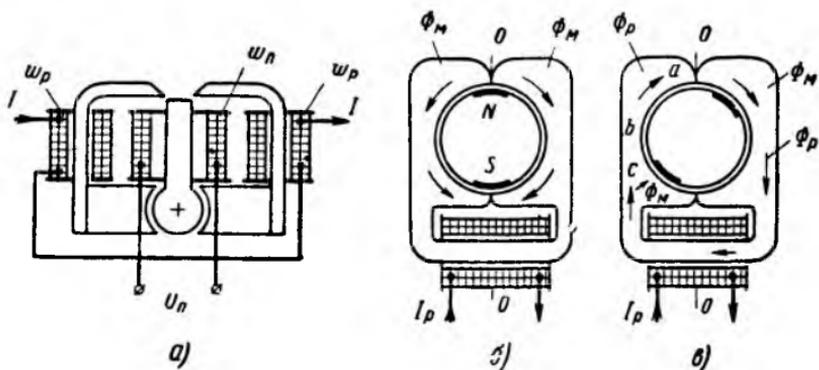


Рис. 1-17. Поляризованные системы преобразователей ток — перемещение.

сти от направления тока I . Момент на якоре при постоянном поле возбуждения пропорционален току в рабочей катушке

$$M = kI.$$

Преобразователь фирмы «Аскания» имеет следующие данные: максимальный вращающий момент на якоре 400—700 $гс \cdot см$; требуемая мощность сигнала для поворота на 1° — 10 $мвт$.

Для углов поворота порядка 10 — 20° применяют поляризованную систему, состоящую из цилиндрического постоянного магнита, намагниченного вдоль одного из диаметров, магнитопровода с кольцевыми зазорами и катушки, обтекаемой постоянным током. При обесточенной катушке постоянный магнит устанавливается так, что его ось намагничивания совпадает с осью симметрии магнитопровода (рис. 1-17,б), так как в данном положении создаются условия наименьшего магнитного сопротивления для потока Φ_M магнита.

При включении катушки создается рабочий поток Φ_p (рис. 1-17,в); при этом изменяются магнитные сопротивления в цепи постоянного магнита. Так, при направле-

нии потока Φ_p , как это изображено на рисунке, для потока магнита увеличивается сопротивление на участке abc и якорь поворачивается по часовой стрелке на угол φ .

Вращающий момент на оси магнита

$$M = kI\omega\Phi_M \cos \varphi.$$

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКТЫ

Измерительным комплектом называется совокупность приборов, предназначенных для измерения данной величины. Он состоит, как правило, из двух частей: а) первичного устройства (датчика), устанавливаемого непосредственно в месте измерения и выдающего информацию о значении измеряемой величины; б) вторичного, в котором перерабатывается полученная информация: реле, визуального или регистрирующего прибора и т. п.

2-1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

Измерительные комплекты предназначаются для решения ряда задач:

а) измерение неэлектрической величины с визуальным отсчетом или с автоматической записью регистрирующими приборами;

б) автоматическое управление, заключающееся в том, что при достижении требуемого значения измеряемой величины подается сигнал на реле или на бесконтактную схему управления;

в) автоматическое регулирование, т. е. поддержание постоянным значения регулируемого параметра. В данном случае преобразователь—датчик с дополнительными элементами—является измерительным элементом регулятора;

г) ввод информации в машины централизованной обработки информации; выходы различных преобразователей в унифицированном виде поочередно, посредством оббегающего устройства подаются на вход машины централизованного контроля, управляющей машины или моделирующих устройств.

2-2. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

При построении измерительных комплектов применяют различные стандартные, а в некоторых случаях специальные элементы и приборы.

Показывающие измерительные приборы — применяются приборы постоянного тока, как правило, магнитоэлектрические, а также переменного тока: ферродинамические, логометры и другие. Выбор типа прибора определяется условиями работы схемы и параметрами прибора: потребляемой мощностью, сопротивлением, чувствительностью — по току или напряжению.

Регистрирующие приборы. Точность таких приборов характеризуется величиной приведенной погрешности, определяемой обычно при статических условиях работы, т. е. при записи медленно изменяющихся процессов. Работа прибора в динамическом режиме, т. е. при быстро меняющихся процессах, существенно отличается от работы в статическом режиме. Из-за влияния масс подвижных частей прибора, а также моментов сопротивлений, пропорциональных скорости перемещения, получают искажения в записи как по амплитуде, так и по фазе. В этих случаях требуется применение самопишущих приборов с повышенным значением собственной частоты колебаний подвижной системы.

Реле. Для целей управления и сигнализации применяют различного вида реле, включаемые на выходе датчика либо непосредственно, либо при применении реле постоянного тока, через выпрямитель. Наибольшее распространение в схемах измерительных комплектов получили поляризованные реле, обладающие рядом преимуществ по сравнению с нейтральными электромагнитными реле:

а) высокой чувствительностью, т. е. малым значением минимальной мощности срабатывания; так, для реле РП-4 $P_{ср} = 0,01 \div 0,16$ мвт;

б) высоким входным сопротивлением — до 8500 ом;

в) большой кратностью термической устойчивости

$$k_T = \frac{P_n}{P_{ср}};$$

здесь P_n — допустимая мощность из условий теплового режима катушки (для катушки реле РП-4 $P_n = 1$ вт).

Благодаря большому значению k_T поляризованное реле может быть установлено в таких мостовых схемах, где требуется срабатывание при малом рассогласовании плеч моста и допускается длительное включение реле при больших значениях рассогласования;

г) способностью реагировать на полярность тока в катушке.

При выборе типов поляризованных реле следует учитывать настройку его контактов. Имеется три вида настройки для реле типа РП:

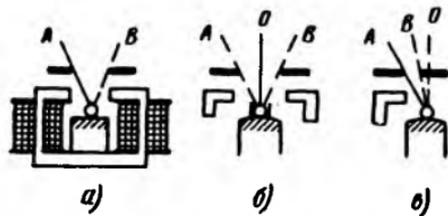


Рис. 2-1. Исполнения контактных систем поляризованных реле.

а — двухпозиционное, *б* — трехпозиционное, *в* — двухпозиционное с преобладанием.

РП-4 — двухпозиционная (рис. 2-1, *а*); якорь реле перебрасывается из положения *А* в *В* и обратно, в зависимости от направления тока в катушке, и остается в заданном положении после выключения тока; РП-5 — трехпозиционная (рис. 2-1, *б*): нормально якорь

реле находится в среднем положении *О* за счет действия пружины и перебрасывается в положение *А* или *В* в зависимости от полярности тока в катушке; при обесточенной катушке якорь возвращается в исходное положение; РП-7 — двухпозиционное с преобладанием (рис. 2-1, *в*): в положении *А* якорь находится или при одной полярности тока в катушке или при обесточенной катушке; в положение *В* якорь перебрасывается при другой полярности тока в катушке.

Следует учитывать, что контактные системы поляризованных реле обладают весьма низкой коммутационной способностью, а также что количество контактов реле невелико. Поэтому в схемах управления на выходе поляризованных реле включают промежуточные реле, имеющие большее количество контактов с большей коммутационной способностью.

Вспомогательные двигатели — такие двигатели требуются для схем с компенсацией: привод пропорционального компенсирующего устройства осуществляется обычно двухфазным конденсаторным электродвигателем.

Последний представляет собой короткозамкнутый асинхронный двигатель с полым ротором или ротором в виде беличьей клетки и двумя обмотками на статоре (см. схему рис. 2-2): обмоткой возбуждения ω_B , подключаемой непосредственно к сети (последовательно с этой обмоткой включен конденсатор C_1 , служащий для создания сдвига по фазе между напряжением сети U_C и индукцией в статоре B), и обмоткой управления ω_U (в обычных схемах эта обмотка подключается непосредственно к сети, в компенсационных схемах измерения эта обмотка включается к выходу электронного усилителя). В этом случае параллельно обмотке ω_U ставится конденсатор C — для шунтирования высших гармоник напряжения.

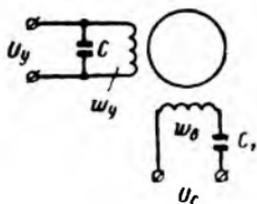


Рис. 2-2. Схема двухфазного конденсаторного электродвигателя.

Особенности работы двигателя:

1. Реверсирование осуществляется поворотом фазы напряжения управления на 180° .

2. Момент на двигателе зависит от амплитуды составляющей напряжения U_y , совпадающей по фазе с напряжением сети.

Таким образом, момент двигателя определяется только активной составляющей выходного напряжения усилителя, реактивная же составляющая не влияет на работу двигателя и только нагружает электронный усилитель.

3. При наличии постоянной составляющей поля обмотки управления создается тормозной момент. Поэтому электронные усилители выполняют так, чтобы при отсутствии сигнала на их входе в обмотке управления протекал выпрямленный ток, а при наличии сигнала на входе на этот ток накладывался переменный ток (см. схему рис. 2-4). Таким путем создаются условия самоторможения двигателя в момент, когда сигнал на входе усилителя становится равным нулю.

В выпускаемых нашей промышленностью устройствах наиболее часто применяют двигатели типа РД-09, 50 гц. Скорость вращения на выходе после редуктора 27 или 81 об/мин, момент на валу при 27 оборотах 2,5 кгс · см.

Вращение двигателя РД-09 начинается при незначительных напряжениях на обмотке управления (в зависимости от нагрузки от 0,4 до 5 в). Имеются исполнения конденсаторных двигателей с большим моментом на валу и с обмоткой, рассчитанной на большую частоту сети.

Выпрямители. Выпрямительные схемы применяются в измерительных комплектах при необходимости пита-

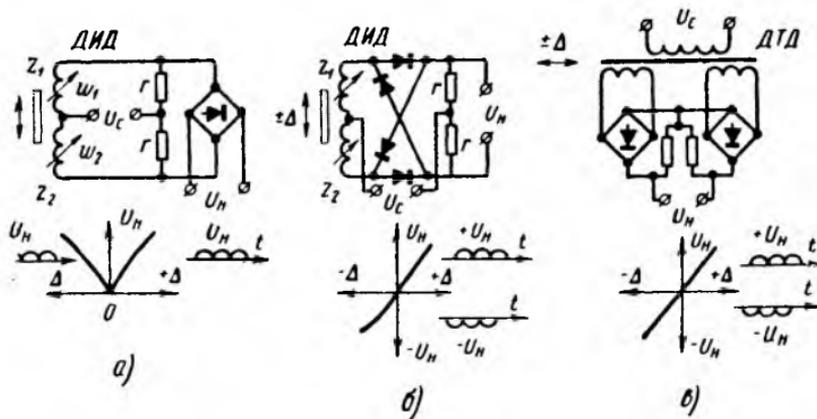


Рис. 2-3. Схемы включения выпрямителей.

ния постоянным током нагрузки: измерительных приборов, реле, обмоток управления, бесконтактных реле. В практике нашли применение разные схемы выпрямления.

В мостовых схемах, состоящих из двух обмоток ДИД и двух сопротивлений, чаще всего применяются измерительные мосты (рис. 2-3,а), в которых полярность выходного напряжения U_H остается неизменной независимо от знака изменения полного сопротивления обмоток ω_1 и ω_2 .

В ряде случаев требуются фазочувствительные схемы, в которых полярность выходного напряжения U_H меняется в зависимости от направления смещения якоря от нейтрального положения (см. рис. 2-3,б).

Выходное напряжение дифференциальных трансформаторных датчиков, равное разности напряжений двух вторичных катушек, нецелесообразно выпрямлять непосредственно (одним выпрямительным мостом), так как при малых значениях этого напряжения сказывается

резкое увеличение сопротивления диодов в прямом направлении. В этом случае применяют два выпрямительных моста, соединенных так, что ток в нагрузке протекает в том или ином направлении в зависимости от знака разности напряжений вторичных катушек (см. рис. 2-3, в).

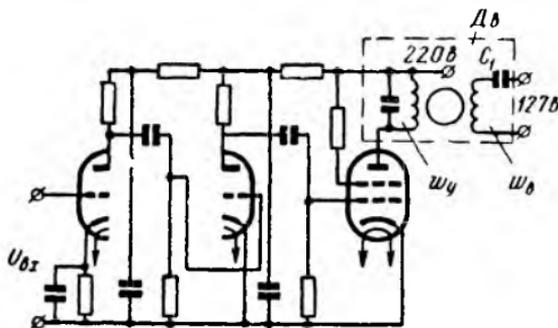


Рис. 2-4. Схема электронного усилителя для управления конденсаторным электродвигателем.

Электронные схемы. В измерительных комплектах применяются различные электронные устройства, построенные на электронных лампах или полупроводниковых приборах.

Ниже рассматриваются несколько примерных схем.

а) *Электронный усилитель для систем компенсации, осуществляемых конденсаторным двигателем.* К таким усилителям, на выходе которых включается обмотка управления конденсаторного двигателя, предъявляются два основных требования: низкое значение порога чувствительности (порядка $0,2 \div 2$ мв) и наличие на выходе выпрямленного пульсирующего тока при отсутствии сигнала в обмотке управления. Второе требование обуславливается необходимостью получения тормозного момента на двигателе.

На рис. 2-4 приведена схема усилителя завода КИП (Харьков), применяемого в выпускаемых заводом устройствах. Питание усилителя осуществляется от сети переменного тока через трансформатор питания и выпрямитель. На схему подается выпрямленное напряжение. Усилитель имеет два каскада усиления по напряжению и один по мощности.

б) *Электронный преобразователь переменного напряжения* (рис. 2-5) служит для усиления и преобразования среднего значения переменного напряжения в постоянный ток или напряжение. Назначение преобразователя — ввод информации в унифицированной форме в обтекаю-

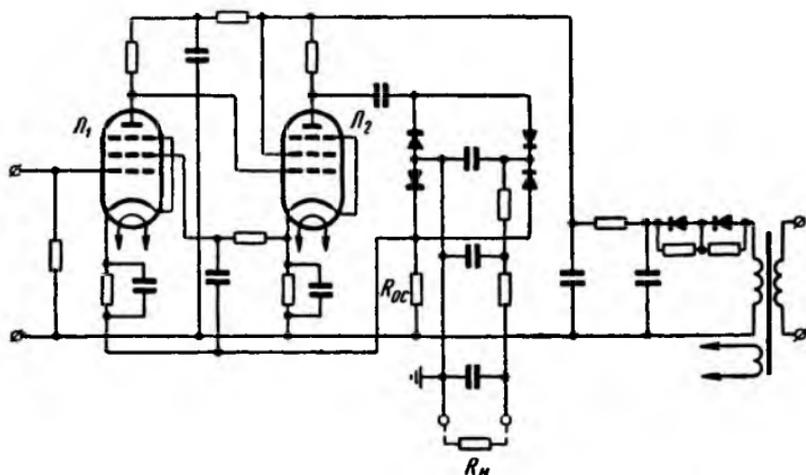


Рис. 2-5. Схема преобразователя переменного напряжения в постоянный ток.

щее устройство машин централизованного контроля и управления, а также для телепередачи постоянным током.

Преобразователь состоит из стабильного двухкаскадного усилителя среднего значения переменного напряжения с глубокой отрицательной связью, снимаемой с сопротивления R_{oc} , включенного последовательно с выпрямительным мостом.

Преобразователь работает с высокой степенью точности: при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ погрешность получается порядка $0,1\%$. При работе на обтекающее устройство, входное сопротивление которого R_H меняется скачком от 3 до 5 ком с временем переключения от 0,1 до 40 мсек, погрешность не превышает $0,1\%$. Преобразователь разработан И. М. Бруком и О. Н. Сутиным (Харьковский политехнический институт).

в) *Электронные генераторы*. Ниже рассматриваются схема и устройство двухконтурного автогенератора с сеточным смещением (рис. 2-6), применяемого в преобразователях пропорционального типа.

Переменной величиной в таких генераторах является индуктивность L_1 в цепи сеточного контура. При изменении значения L_1 меняется амплитуда генерируемого напряжения, а следовательно, и величины смещения: выходной ток лампы изменяется от значения, близкого ну-

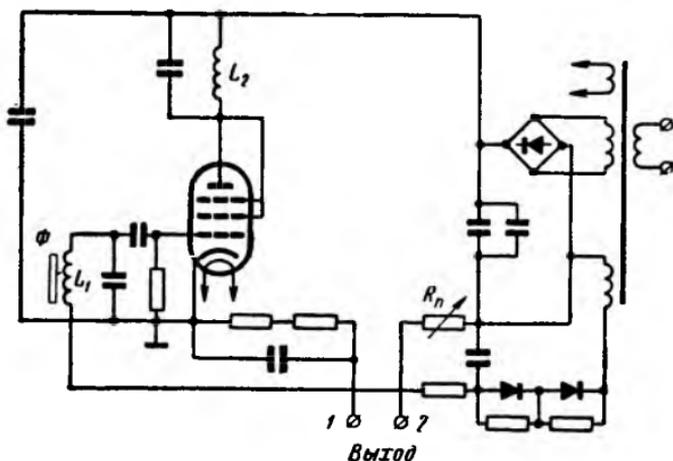


Рис. 2-6. Схема двухконтурного генератора с сеточным смещением.
 Φ — алюминиевый флажок, управляющий индуктивностью катушки.

лю, до максимального. Индуктивность L_1 выполняется в виде плоской спиральной катушки, укрепленной на пластмассовой основе. Значение L_1 изменяется при приближении к катушке плоского алюминиевого флажка Φ .

2-3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКТОВ

Точность измерений, осуществляемых измерительным комплектом, определяется погрешностями, возникающими в процессе его работы. Источниками погрешностей являются как внешние факторы — колебания напряжения и частоты питания, температуры, — так и факторы, определяемые параметрами комплекта, — нелинейностью характеристики, сдвигами по фазе между входными и выходными величинами, низким порогом чувствительности и другими.

В зависимости от назначения комплекта к нему предъявляются различные требования в отношении точ-

ности измерения. При измерении параметров технологических процессов необходима точность порядка 0,5—1% (класс 0,5 или класс 1); в ряде случаев допускается погрешность порядка 2%, в схемах управления и сигнализации допускаются значительные погрешности (до 10%). Ниже коротко рассматриваются отдельные факторы, определяющие погрешность измерения.

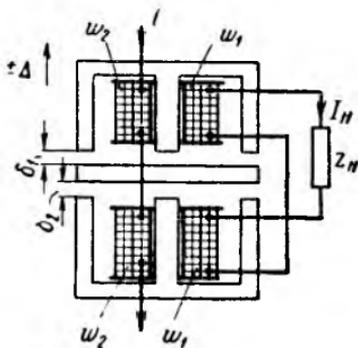


Рис. 2-7. Схема дифференциально-трансформаторного датчика.

а) *Колебания напряжения и частоты источника энергии.* По нормам допускаются отклонения напряжения сети в пределах $-15 \div +10\%$ номинального. Принимаются меры для уменьшения погрешности измерения, определяемой колебанием напряжения сети. Так, в ряде устройств применяют феррорезонансные стабилизаторы напряжения. Следует, однако, учитывать, что погреш-

ность самого стабилизатора относительно велика: при колебаниях входного напряжения на величину $\pm 10\%$ получается ошибка порядка $1 \div 2\%$, а при колебаниях частоты на 5% — от 4 до 8%. Следует также учитывать, что выходное напряжение стабилизатора несинусоидально. В ряде случаев при построении измерительных комплектов классов 0,5—2 устройства выполняют по таким схемам, при которых не сказываются колебания напряжения и частоты (см. § 2-9).

б) *Колебания температуры* сказываются на параметрах выпрямителей, полупроводниковых диодов и триодов, реле и катушек датчиков.

в) *Нелинейность характеристик* элементов датчика, например, характеристики $\Delta = f_1(p)$ мембраны, и $\Delta E = f_2(\Delta)$ датчика, где Δ — прогиб, ΔE — выходное напряжение, значительно сказывается на точности работы комплекта. Уменьшением диапазона хода якоря эту нелинейность сводят до 0,2—0,4% полного значения хода.

г) *Амплитудные погрешности* определяются режимом нагрузки датчика. Различают два режима работы по нагрузке: режим холостого хода, когда сопротивление на-

грузки z_H во много раз больше полного сопротивления катушки датчика z_d , и режим нагрузки, когда z_H соизмеримо с z_d . При режиме нагрузки возникают амплитудные погрешности.

Рассмотрим для примера схему с ДТД и измерительным прибором (рис. 2-7).

Примем, что якорь смещен от нейтрали вверх на величину Δ , при этом $\delta_1 < \delta_2$ и проводимости магнитных систем неодинаковы: $G_1 > G_2$. В каждом из магнитопроводов имеются потоки: основные Φ_1 и Φ_2 , определяемые м. д. с. $I\omega_1$ и проводимостями G_1 и G_2 , и поток Φ_H , определяемый м. д. с. тока нагрузки:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \sqrt{2}I\omega_1 G_1; & \Phi_2 &= \sqrt{2}I\omega_1 G_2; \\ \Phi_{H1} &= \sqrt{2}I_H\omega_2 G_1; & \Phi_{H2} &= \sqrt{2}I_H\omega_2 G_2.\end{aligned}$$

Поток Φ_{H1} размагничивает верхний магнитопровод, а Φ_{H2} подмагничивает нижний.

Электродвижущие силы на выходе обеих катушек преобразователя:

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= \omega\omega_2 G_1 (I\omega_1 - I_H\omega_2); \\ \dot{E}_2 &= \omega\omega_2 G_2 (I\omega_1 + I_H\omega_2).\end{aligned}$$

Тогда разность э. д. с., подаваемая на нагрузку:

$$\Delta E = \omega I \omega_1 \omega_2 (G_1 - G_2) - \omega I_H \omega_2^2 (G_1 + G_2).$$

Искажение по амплитуде зависит от нагрузки и определяется членом

$$\omega I_H \omega_2^2 (G_1 + G_2).$$

Необходимо применять измерительные приборы с большим внутренним сопротивлением, при этом уменьшается значение I_H . В точных измерительных комплектах схема выполняется так, чтобы датчик работал в режиме холостого хода, т. е. в установившемся режиме измерения $I_H \approx 0$. Такое условие выполняется в схемах с электронными усилителями: выходное напряжение включается в сеточную цепь электронной лампы.

д) *Фазовые погрешности* определяются в основном неполной симметрией магнитных систем, а также изменениями фазовых углов полных сопротивлений катушек. Рассмотрим, например, схему датчика, приведенную на рис. 1-4. Напряжение U_{ab} на выходе схемы равно нулю при условии равенства зазоров: $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$.

Тогда полное сопротивление катушек

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 = r_0 + j\omega L_0.$$

При смещении якоря на величину Δ изменяются как индуктивные, так и активные составляющие полного сопротивления катушек:

$$Z_1 = r_1 + j\omega(L_0 + \Delta L); \quad Z_2 = r_2 + j\omega(L_0 - \Delta L),$$

где r_1 и r_2 — приведенные сопротивления с учетом потерь в катушках $P_{K} = I^2 r_K$ и потерь P_{II} на гистерезис и вихревые токи:

$$r_1 = \frac{U^2}{P_{K1} + P_{II1}}; \quad r_2 = \frac{U^2}{P_{K2} + P_{II2}}.$$

Величины P_K и P_{II} неодинаковы для обеих магнитных систем, так как при смещении якоря неодинаковы токи в катушках и величина индукции в магнитопроводе. В результате получаются разные углы потерь в обоих магнитопроводах, что приводит к несовпадению фаз полных сопротивлений Z_1 и Z_2 . Значительные фазовые погрешности могут иметь место в устройствах, где сочетаются датчики разной конструктивной формы. Так, в схеме рис. 2-18 сочетаются дифференциальный трансформаторный и ферродинамический датчики со встречным включением их выходных напряжений. Соответствующей настройкой возможно достигнуть совпадения характеристик этих датчиков по амплитудному значению, но при этом не исключаются фазовые погрешности, определяемые разными величинами потерь в магнитопроводах. Указанные погрешности значительно снижаются при применении магнитных материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением, значение индукции B в стали должно быть возможно меньшим (снижают до величины 0,05—0,1 тл).

е) *Силы на якоре*, возникающие при его смещении от нейтрали, искажают характеристику механически связанного с ним чувствительного элемента (мембраны, сильфонов и т. п.). Лучшее решение получается при выполнении магнитопроводов цилиндрической формы, в которых дополнительная сила на якоре, возникающая при смещении якоря от нейтрали, получается незначительной, порядка 1—2 гс. Высокая точность устройства достигается применением систем с силовой компенсацией, в которых измерение производится при нулевом смещении якоря от нейтрали (см. § 2-12).

ж) *Класс точности вторичного измерительного прибора* оказывает влияние на класс точности всего комплекта в целом.

2-4. КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

При расчете измерительного комплекта учитывают статические и динамические характеристики отдельных элементов схемы. Статические характеристики определяются коэффициентом преобразования k , представляющим собой отношение выходной величины ко входной. При определении устойчивости и качества переходного процесса сложных измерительных комплектов учитываются данные о передаточных функциях элементов устройства. Методика определения передаточных функций рассматривается в литературе по теории автоматического регулирования. Приводим несколько примеров определения коэффициентов преобразования.

а) *Чувствительный элемент*. Входной величиной является измеряемый параметр: давление, температура, перепад давлений и другие. Если чувствительным элементом производится преобразование перепада давлений P_{Π} , измеряемого в миллиметрах водяного столба, в линейное перемещение Δ (мм), то

$$k_{\text{ч.э.}} = \frac{\Delta}{P_{\Pi}} [\text{мм/мм вод.ст.}].$$

б) *Индуктивный датчик*. Различаются значения k по напряжению и по мощности. Коэффициент по напряжению учитывается в случае, если на выходе датчика включают приборы или устройства, входное сопротивление

ние которых во много раз больше выходного сопротивления датчика:

$$k_{\text{д}} = \frac{E}{\Delta} \text{ [в/мм]}.$$

Коэффициент по мощности целесообразно учитывать в тех случаях, когда сопротивление нагрузки соизмеримо с выходным сопротивлением датчика:

$$k_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}}}{\Delta} \text{ [вт/мм]}.$$

в) *Измерительный прибор*. Коэффициент преобразования определяется как отношение отклонения стрелки прибора (в градусах) к напряжению U , току I или мощности P , подводимым к прибору:

$$k_{\text{пр}} = \frac{\varphi\eta}{U} \text{ [град/в]}; \quad k_{\text{пр}} = \frac{\varphi\eta}{I} \text{ [град/а]}$$

$$k_{\text{пр}} = \frac{\varphi\eta}{P} \text{ [град/вт]}.$$

Коэффициентом η учитываются потери мощности в промежуточных между прибором и датчиком элементах: выпрямителях, сопротивлениях. Последние соотношения справедливы для случая, когда измерительный прибор имеет равномерную шкалу.

г) *Реле*. Коэффициент k определяется минимальными значениями напряжения, тока или мощности срабатывания.

д) *Двухфазный конденсаторный двигатель*. Коэффициент преобразования определяется минимальным напряжением ΔU на обмотке управления, при котором начинается вращение двигателя:

$$k_{\text{дв}} = \frac{1}{\Delta U}.$$

е) *Преобразователи ток — перемещение (сила)*. Учитывается отношение силы или момента, развиваемых на выходе преобразователя, к току в рабочей катушке:

$$k_{\text{с}} = \frac{Q}{I} \text{ [кгс/а]};$$

$$k_{\text{с}} = \frac{M}{I} \text{ [кгс·см/а]}.$$

Общий коэффициент преобразования ряда последовательно включенных элементов равен произведению коэффициентов преобразования этих элементов.

Порог чувствительности измерительного комплекта $S_{\text{пор}}$ — величина, обратная общему коэффициенту преобразования.

Приведем пример определения порога чувствительности измерительного комплекта, состоящего из следующих элементов: чувствительного дифференциального трансформаторного датчика, электронного усилителя, двухфазного конденсаторного двигателя (см. схему рис. 2-16). Чувствительный элемент измеряет перепад давлений от 0 до 100 мм вод. ст., ход мембраны Δ при $p_{\text{н}}=100$ мм вод. ст. составляет 2 мм, $k_{\text{ч.э}}=0,02$ мм/мм вод. ст. ДТД — цилиндрический с $k_{\text{д}}=0,5$ в/мм. Коэффициент усиления электронного усилителя $k_{\text{у}}=1000$. Двигатель: минимальное напряжение срабатывания

$$U_{\text{дв мин}}=5 \text{ в}; k_{\text{дв}}=0,2.$$

Порог чувствительности всего комплекта

$$S_{\text{пф}} = \frac{1}{k_{\text{ч.э}} k_{\text{д}} k_{\text{у}} k_{\text{дв}}} = 1 \text{ мм вод. ст.}$$

2-5. ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЛЕ В ЦЕПЬ ДАТЧИКОВ

Релейные схемы применяются в основном для целей блокировки, например при построении бесконтактных путевых и концевых выключателей или датчиков скорости, срабатывающих при резких снижениях скорости механизмов. В таких случаях режим работы выходного элемента схемы должен быть релейным.

На рис. 2-8 приведена схема, содержащая ряд цепей с одинарными индуктивными датчиками и реле. Последовательно с катушкой датчика включается реле P переменного тока (цепи a , b , c) или постоянного — через выпрямитель (схема d).

Когда якорь датчика находится вне магнитопровода, полное сопротивление катушки датчика $Z_{\text{д}}$ невелико и реле P срабатывает; при перемещении якоря в зону полюсов $Z_{\text{д}}$ резко повышается (от 2 до 10 раз в зависимости от величины конечного воздушного зазора) ток

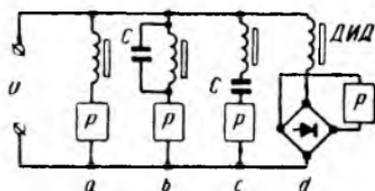


Рис. 2-8. Схемы включения реле в цепи одинарных индуктивных датчиков.

в цепи падает и реле отключается. Для получения более резкого эффекта срабатывания или отключения реле добавляют конденсаторы с образованием контура резонанса тока или напряжения (цепи b и c). В зависимости от того, настроены контуры на резонанс при малом значении z_d или большом, получают срабатывание реле при расположении якоря датчика вне магнитопровода или же в зоне полюсов датчика.

В схемах с датчиками магнитоиндукционного типа (МИД) выход датчика через выпрямитель подается на высокочувствительные реле, например поляризованное, срабатывание которого приводит к срабатыванию последующего, более мощного реле, например типа МКУ или КДР.

2-6. НЕРАВНОВЕСНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

При применении неравновесных мостовых схем выходной сигнал, характеризующий измеряемую величину, получают при разбалансе моста.

В мостовых схемах применяют дифференциальные индуктивные датчики ДИД (см. рис. 2-9). Равновесное положение моста получается только при условии равенства зазоров в обеих частях датчика. В процессе измерения, когда зазоры неодинаковы, равновесие моста нарушается.

Кривые выходных напряжений (действующее значение) $U_n = f(\Delta)$ приведены на рис. 2-9,г. С изменением знака перемещения Δ изменяется на 180° фаза выходного напряжения.

Величина U_n зависит от значения напряжения сети U_c . На рис. 2-9,г пунктиром показана кривая выходного напряжения при снижении U_c ($U_{c2} < U_{c1}$).

Наиболее распространенной является схема рис. 2-9,а с двумя омическими сопротивлениями в двух плечах моста. Схема рис. 2-9,в с трансформатором применяется в тех случаях, когда требуется согласовать сопротивление нагрузки прибора z_n с сопротивлением датчика.

В случае применения измерительных приборов постоянного тока на выходе моста ставятся выпрямительные схемы: мостовая (рис. 2-3,а) — для приборов с нулем в начале шкалы и демодулятор (рис. 2-3,б) — для приборов с нулем посередине.

При составлении мостовых схем и конструировании датчиков принимают меры для уменьшения погрешности измерения: питание моста осуществляется через стабилизатор напряжения, детали магнитопровода выполняют

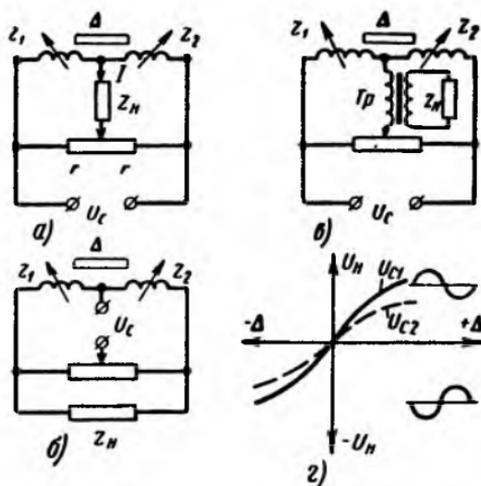


Рис. 2-9. Схемы неравновесных мостов с дифференциальными индуктивными датчиками.

шихтованными из листового материала с малыми значениями потерь.

Имеются, однако, случаи, где неизбежно возникновение значительных потерь в стали. Так, при выполнении датчиков для измерения параметров турбин — осевого сдвига, относительного расширения ротора и корпуса — роль якоря выполняет массивный вращающийся диск, в котором при вращении возникают токи резания, пропорциональные скорости вращения. В таком датчике возникают значительные фазовые сдвиги между напряжениями отдельных обмоток, что приводит к увеличению погрешностей измерения. При выполнении соответствующих мероприятий: применения для диска материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением, например инвара, пермаллоя, а также уменьшении значения магнитной индукции в стали эта погрешность может быть значительно уменьшена.

Работа индуктивного датчика рассматривается обычно в статическом режиме, т. е. предполагается, что

скорость перемещения якоря невелика. Имеются, однако, случаи, когда требуется производить измерение максимального смещения непрерывно колеблющихся деталей и датчик работает в динамическом режиме. На выходе мостовой схемы получается модулированное колебание

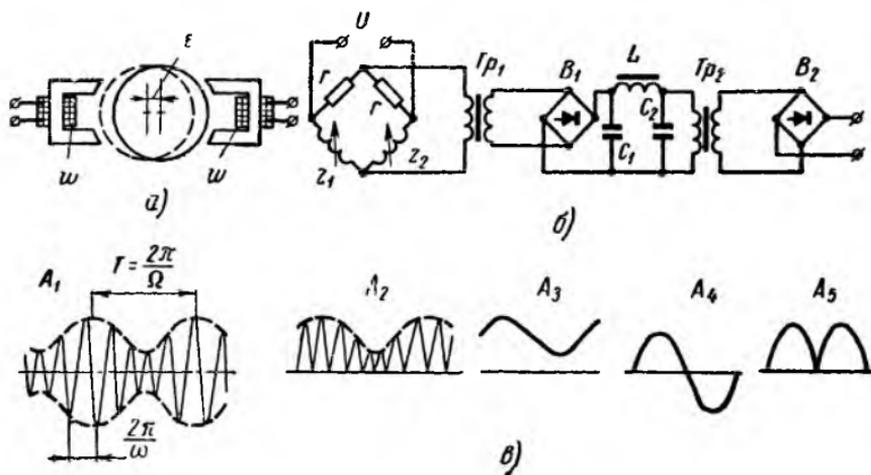


Рис. 2-10. Схема и кривые напряжений преобразователя, работающего в динамическом режиме.

A_1 — после Tp_1 ; A_2 — после B_1 ; A_3 — после фильтра; A_4 — после Tp_2 ; A_5 — после B_2 .

напряжения: на синусоидальное напряжение с частотой источника тока накладывается некоторый закон изменения амплитуды колебаний.

Если напряжение источника питания синусоидальное

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то выходное напряжение мостовой схемы изменяется по закону (рис. 2-10, в):

$$u = U_m (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega t;$$

здесь ω — несущая частота;

Ω — частота модуляции, определяемая частотой колебаний детали;

m — глубина модуляции.

Для повышения четкости работы измерительной схемы значение ω принимается в 10—20 раз большим Ω .

Динамический режим работы датчика имеет место при измерении величины биения — эксцентricитета ε — вращающихся валов (рис. 2-10,а). Значение ε колеблется в пределах 0—0,5 мм. На вал насажен диск, по обе стороны которого расположены магнитопроводы дифференциального индуктивного датчика. При скорости вращения вала турбины 3 000 об/мин значение частоты модуляции

$$f_m = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{3\,600}{60} = 50 \text{ гц.}$$

Частота источника питания принимается равной 500—1 000 гц. На выходе мостовой схемы получается модулированное напряжение.

Величина эксцентricитета измеряется обычно магнитоэлектрическим прибором. Поэтому схема (рис. 2-10,б) должна содержать выпрямители и фильтры, а также промежуточные трансформаторы.

Кривые на рис. 2-10,в обозначают выходные напряжения после разных элементов схемы: A_1 — после трансформатора Tr_1 ; A_2 — после выпрямителя B_1 ; A_3 — после фильтра, рассчитанного на сглаживание напряжения несущей частоты; A_4 — после трансформатора Tr_2 ; A_5 — после выпрямителя B_2 .

Среднее значение тока в измерительном приборе пропорционально амплитуде биений.

2-7. СХЕМЫ СРАВНЕНИЯ

Для увеличения точности измерения применяются схемы сравнения, в которых измерение осуществляется сравнением данных, полученных от рабочего датчика и эталонного.

Отсчет может производиться при нулевом положении стрелки измерительного прибора. При таком методе измерения исключаются погрешности, определяемые колебаниями напряжения и частоты источника питания.

Схемы с логометрами (рис. 2-11). В качестве измерительного прибора применяют логометр — прибор, измеряющий отношение двух токов. Прибор включается по мостовой схеме с применением двух одинарных индуктивных датчиков — измерительного z_1 и эталонного z_2 .

При равенстве зазоров в обоих датчиках ($\delta_1 = \delta_2$) получается равенство токов $I_1 = I_2$, и отношение их $I_1/I_2 = 1$. При этом показание логометра равно нулю. При $\delta_1 \neq \delta_2$ стрелка логометра отклоняется от нуля вправо или влево.

Такие устройства применяют, например, для контроля размеров обрабатываемых деталей. Эталонном служит датчик с установленным зазором δ_0 ; зазор δ второго датчика соответствует размерам обрабатываемой детали. При обработке отдельных деталей допускаются предельные отклонения в ту или иную сторону от номинального размера. Поэтому необязательно выполнять шкалу прибора с делениями. Вправо и влево от нулевой линии намечаются деления, соответствующие максимальному отклонению, за пределы которого не должна отклоняться стрелка.

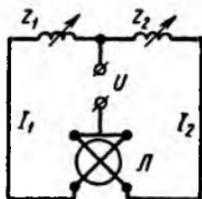


Рис. 2-11. Схема включения логометра в цепь ДИД.

Колебания напряжения и частоты источника питания не сказываются на показаниях логометра, так как при этом значения токов I_1 и I_2 меняются приблизительно одинаково. Недостатком логометров является большая потребляемая мощность. Это сказывается на погрешности измерения. Поэтому приходится датчики выполнять так, чтобы их мощность во много раз (20—30) превосходила потребляемую мощность прибора.

Схемы с ДТД. Более точное измерение по сравнению со схемами с логометрами осуществляется применением дифференциальных трансформаторных датчиков с работой их через выпрямитель на магнитоэлектрический прибор. Точность измерения по схеме сравнения определяется условием равенства нулю выходного напряжения при равенстве зазоров в обоих датчиках: измерительного $E_{и}$ и эталонного $E_{э}$. Для этого требуется, чтобы значения э. д. с. $E_{и}$ и $E_{э}$ на выходе датчиков были равны по амплитуде и совпадали по фазе.

В реальных условиях значение разности $E_{а} - E_{э}$ в функции $\delta_1 - \delta_2$ отличается от идеального, так как весьма трудно обеспечить полную магнитную и электрическую симметрию обеих частей датчика. Небольшим смещением от нейтрали возможно достигнуть равенства амплитуд выходных напряжений, но сдвиг по

фазе между ними все же остается и на выходе схемы имеет место напряжение небаланса. При построении схем сравнения пользуются поэтому выпрямленными напряжениями: при этом исключается влияние фазовых сдвигов, а амплитудная погрешность устраняется настройкой сопротивлений.

Пример 1. На рис. 2-12 показана схема устройств для точной разбраковки деталей, например роликов, с допуском 2 мк. ДТД состоит в данном устройстве из двух отдельных частей: эталона Э, в котором величиной δ_0 задается размер детали с точностью ± 2 мк и измерителя И. Якорь измерителя перемещается вверх и вниз в зависимости от размеров детали.

Равенство зазоров $\delta_0 = \delta$ показывает соответствие размеров измеряемой детали заданным. На выходе измерительной схемы включается магнитоэлектрический прибор с нулем посередине: при соответствии размеров детали заданным стрелка прибора находится посередине шкалы, отклонению стрелки от нуля в ту или иную сторону соответствует положительное или отрицательное отклонение

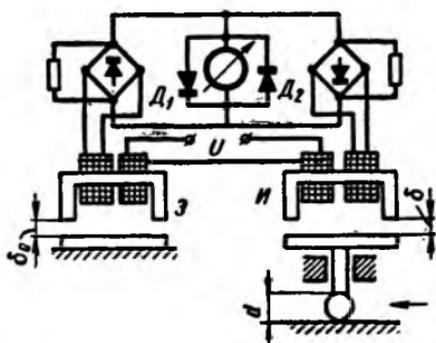


Рис. 2-12. Схема устройства для разбраковки роликов методом сравнения.

шкалы. Однако при больших отклонениях в размерах измеряемой детали получается недопустимая перегрузка прибора. Для ее устранения шунтируют катушку прибора диодами D_1 и D_2 : до определенного напряжения на диоде сопротивление его в прямом направлении, $R_{д.п}$ очень велико. При напряжениях порядка $0,2 \div 0,3$ в сопротивление $R_{д.п}$ резко падает и катушка прибора шунтируется диодом.

(В тех случаях, когда напряжение порядка $0,2$ в велико для прибора, катушку последнего шунтируют полупроводниковыми триодами.

Вместо измерительного прибора возможно применить поляризованное реле с двумя катушками, включенными так, чтобы их м. д. с. действовали встречно; контакты реле включаются на сигнальное

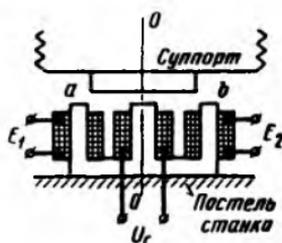


Рис. 2-13. Схема датчика для точной установки суппорта.

размеров детали. С целью повышения точности отсчета стремятся применить прибор с минимальными пределами

устройство, по которому судят о соответствии размеров детали заданным и о знаке отклонения положительном или отрицательном.

Пример 2. На рис. 2-13 приведен эскиз датчика для точной установки суппорта в исходном положении.

Магнитная система ДТД укрепляется на станине станка, а якорь — на суппорте. Длина якоря принимается равной расстоянию между полюсами (точки *a* и *b*). Вторичные обмотки датчика включаются по схеме, аналогичной рис. 2-12, с выходом на измерительный прибор. Стрелка прибора устанавливается в нуле в момент, когда якорь расположен полностью симметрично по отношению к магнитопроводу (положение 0—0). В выполненных устройствах достигается точность установки суппорта в пределах ± 20 мк.

2-8. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

К устройствам измерения параметров технологических процессов предъявляются высокие требования в отношении точности и быстродействия. Погрешность измерения не должна быть выше 0,5—1%, в некоторых случаях допускается 2%, длительность процесса измерения при изменении параметра от нуля до номинального должна быть от десятых долей секунды до нескольких секунд.

Для достижения требуемой точности схемы измерения часто выполняют в виде замкнутой следящей системы. Благодаря наличию обратной связи осуществляется компенсация измеряемых величин, а это приводит к уменьшению до минимума влияния колебаний напряжения и частоты источника питания, нелинейности чувствительных элементов и датчиков, изменений температуры.

Такие схемы называют компенсационными. В практике нашли широкое применение две группы компенсационных преобразователей, отличающихся по виду характеристики:

$$A = A(P),$$

где *A* — выходной параметр, аналоговая величина;

P — измеряемая механическая величина;

а) интегральные *I* с полной компенсацией выходной величины первичного датчика. Характеристика таких систем в установившемся режиме описывается соотношением

$$A = kP,$$

т. е. значение *A* пропорционально *P* (рис. 2-14);

б) пропорциональные Π с неполной компенсацией выходной величины первичного датчика; при этом получается некоторая погрешность, определяемая статизмом системы (рис. 2-14).

Коэффициент статизма (непропорциональности) системы

$$\sigma = \frac{A_{\text{н}} - A}{A_{\text{н}}},$$

где $A_{\text{н}}$ — аналоговая выходная величина, получающаяся при полной компенсации системы, A — при неполной. Таким образом, характеристика пропорциональной системы соответствует соотношению

$$A = (k - \sigma)P.$$

В изданной ранее литературе интегральные системы называются астатическими, а пропорциональные — статическими. В последующих параграфах приводятся примеры построения компенсационных систем измерения обеих групп, а также методы определения их характеристик в установившемся режиме. Построение динамических характеристик, показывающих поведение систем в переходном режиме, рассматривается в литературе, посвященной теории автоматического регулирования.

Условные изображения. Для упрощения схем различных преобразователей примем условные изображения их элементов, приведенные на рис. 2-15; дифференциально-трансформаторных датчиков (ДТД), ферродинамических датчиков угла поворота (ФДД), магнитных систем, магнитно-электрических (МЭС) и ферродинамических (ФДС).

Особенности интегральных (И) и пропорциональных систем (П). Наша отечественная промышленность производит в большом количестве разнообразные устройства, выполненные по интегральной системе: автоматические мосты и потенциометры, автоматические регуляторы и другие. Одновременно проводятся разработка и

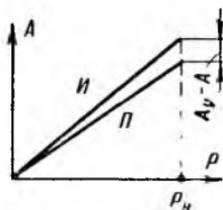


Рис. 2-14. Характеристики компенсационных измерительных систем: «И», «П».

подготовка к выпуску устройств, выполняемых по пропорциональной системе.

Основными факторами, влияющими на выбор системы, являются их конструктивные и технологические особенности, область применения, вид выходного сигнала, стабильность и другие. Подробный сравнительный анализ обеих систем не входит в задачу данной книги, и здесь приводятся лишь в кратком виде общие соображения по данному вопросу.

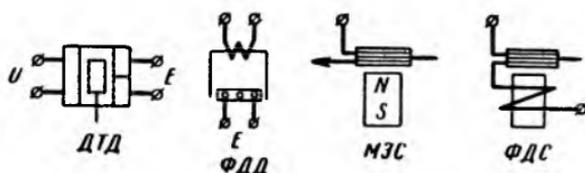


Рис. 2-15. Условные изображения элементов компенсационных схем.

Система И состоит из нескольких простых по конструкции элементов: датчиков, электродвигателей конденсаторного типа, усилителей переменного тока с относительно невысоким коэффициентом усиления (1 000—3 000) или релейных элементов.

Система П требует усилителей с высоким коэффициентом усиления, что приводит к снижению стабильности системы. Основными элементами системы являются магнитно-электрические и ферродинамические преобразователи. Конструкция таких устройств с учетом требуемой точности, возможности регулировок и устранения температурных погрешностей получается сложной.

Область применения. Система И, содержащая в себе двигатель, развивающий значительный момент (см. § 2-2), может быть применена для построения приборов с силовой компенсацией, в которых для компенсации деформации чувствительного элемента, например манометрической трубки, требуются большие значения сил.

По системе И возможно построить приборы для измерения больших перемещений элементов устройств (с компенсацией по перемещению), в которых подвижные части механизмов не должны иметь механического контакта с датчиками.

Построение приборов и устройств последней группы по системе П приводит к большой конструктивной сложности.

Быстродействие. Система И обладает ограниченным быстродействием: переходный процесс при изменении измеряемой величины от нуля до номинального значения длится от 2 до 8 сек. Поэтому такие системы неприменимы для измерения быстропеременных процессов. Длительность переходного процесса системы П получается порядка 10—20 мсек, что позволяет применять их для измерения быстропеременных процессов.

Вид информации. В соответствии с ГОСТ 9895-61 установлены следующие выходные сигналы преобразователей: постоянный ток в пределах 0—5 ма, постоянное напряжение 0—10 в, переменное напряжение 0—2 в.

В приборах И получается выход в виде переменного напряжения или угла поворота вала, и эти приборы удобны для связи с электронными регуляторами, в которых, как правило, применяются усилители переменного тока.

В приборах системы П получается выход в виде постоянного тока и напряжения. Эти приборы удобны для связи с информационными и управляющими машинами, которые выполняются с учетом ввода такого вида информации.

Телепередача. Выход приборов системы И приспособлен для дистанционной передачи информации. Для телепередач ближнего действия требуется преобразование выхода в постоянный ток, что связано с добавлением стабилизаторов, усилителей и уменьшением точности измерения. Точковый выход приборов системы П позволяет осуществлять как дистанционную, так и телепередачу ближнего действия (до 10 км) без применения дополнительных устройств.

Компактность устройства. Вторичные приборы системы И содержат в себе, помимо компенсационного, еще устройства для визуального отсчета и для автоматической записи.

Для приборов системы П, в случае если выход прибора не подается в информационные или управляющие машины, требуется применение дополнительных визуальных и регистрирующих приборов.

2-9. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Примерная схема преобразователя давления приведена на рис. 2-16. Все устройство состоит из двух частей: первичного прибора *П.Пр*, установленного в месте замера давления, и вторичного *Вт. Пр*, монтируемого на щите.

Измеряемое давление p подводится к чувствительному элементу *Ч.Э* мембранного типа. При деформации

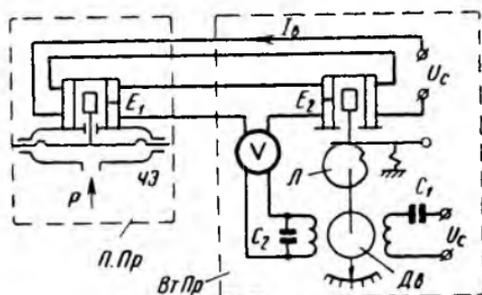


Рис. 2-16. Схема измерения давления. *П.Пр* и *Вт.Пр*—первичный и вторичный приборы. *Л*—лекало.

мембраны перемещается якорь измерительного ДТД, на выходе которого получается э. д. с. E_1 , пропорциональная деформации δ_1 . Во вторичном приборе встроен компенсационный ДТД, выходное значение э. д. с. которого равно E_2 .

Разность э. д. с. $\Delta E = E_1 - E_2$ подается через усилитель на обмотку управления двухфазного конденсаторного двигателя. На оси двигателя насажен профильный кулачок-лекало, перемещающий якорь компенсационного датчика до тех пор, пока значение э. д. с. E_2 не будет равно E_1 . В этот момент двигатель останавливается.

Угол поворота двигателя является в данном устройстве аналогом измеряемого давления p , показания прибора отсчитываются по положению стрелки, кинематически связанной с осью двигателя.

Структурная схема преобразователя показана на рис. 2-17.

Основные соотношения для построения статической характеристики системы (в установившемся режиме).

Уравнение чувствительного элемента:

$$c\delta_1 = pS = Q, \quad (2-1)$$

где p — давление, кгс/см²;

c — жесткость мембраны, кгс/см;

S — площадь мембраны, см²;

δ_1 — прогиб мембраны, см.

Обмотки возбуждения обоих датчиков — измерительного и компенсационного — обтекаются общим током возбуждения I_B , пропорциональным напряжению се-

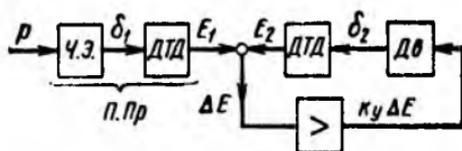


Рис. 2-17. Структурная схема компенсационного преобразователя «И».

ти U_c . Введем дополнительно коэффициент α , учитывающий отклонение напряжения U_c от номинального $U_{c.н}$:

$$\alpha = \frac{U_c}{U_{c.н}},$$

Электродвижущая сила измерительного датчика

$$E_1 = \alpha k_d \delta_1, \quad (2-2)$$

где k_d (в/см) — коэффициент преобразования датчика при номинальном напряжении сети.

Электродвижущая сила компенсационного датчика

$$E_2 = \alpha k_d \delta_2, \quad (2-3)$$

где δ_2 — перемещение плунжера компенсационного датчика.

Напряжение на входе обмотки управления двигателя с учетом коэффициента усиления усилителя:

$$U_y = k_y (E_1 - E_2) = \alpha k_d k_y (\delta_1 - \delta_2). \quad (2-4)$$

В идеальном случае, при моменте трения подвижной системы измерительного комплекта, равном нулю, остановка двигателя происходит при напряжении управления $U_y=0$, т. е. двигатель останавливается при условии [см. (2-4)]

$$\delta_1 = \delta_2. \quad (2-5)$$

Перемещение δ_2 плунжера компенсационного датчика пропорционально углу поворота оси двигателя:

$$\delta_2 = k\varphi. \quad (2-5a)$$

Подставляя из (2-1) значение δ_1 , а из (2-5a) значение δ_2 , имеем из (2-5):

$$\frac{pS}{c} = k\varphi, \text{ или } \varphi = \frac{S}{ck} p. \quad (2-6)$$

Таким образом, в данной системе имеет место прямая пропорциональность между показаниями прибора и давлением на мембрану. Полученная характеристика прибора определяется тем, что основным звеном в цепи компенсации является двигатель — интегрирующее звено, работа которого описывается уравнением

$$\varphi = \int U_y dt.$$

В реальных условиях напряжение управления, соответствующее моменту остановки двигателя, не равно нулю:

$$U_{y0} > 0.$$

При этом возникает погрешность измерения.

Из (2-4)

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{U_{y0}}{ak_d k_y}. \quad (2-7)$$

С учетом (2-1), (2-6) и (2-7) имеем:

$$\varphi = \frac{S}{ck} p - \frac{U_{y0}}{ak_d k_y k}. \quad (2-8)$$

Погрешность измерения определяется вторым членом правой части (2-8). Влияние колебаний напряжения

сети учитывается коэффициентом α . При больших значениях k_y — коэффициента усиления усилителя — погрешность измерения доводится до минимума.

В выполненных приборах эта погрешность получается порядка 0,5% при $\alpha=1$, а при $\alpha=0,9$ увеличивается до 0,55%.

2-10. ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Вторичные приборы с ферродинамическими датчиками. Помимо приборов, в которых в качестве компенсационных применяется дифференциальный трансформаторный датчик, выпускаются приборы с ферродинамическими датчиками. В некоторых схемах эти приборы работают совместно с первичными преобразователями, снабженными дифференциально-трансформаторными датчиками (рис. 2-18). Поскольку ДТД — измерительный и ФДД — компенсационный неидентичны по конструкции, требуется тщательная пригонка обоих устройств по выходной характеристике; фазовые углы выходных э. д. с. должны быть одинаковыми. Для этой цели ФДД выполняются так, что в них имеется возможность регулирования фазового угла и выходного значения э. д. с. (см. § 3-9).

Во вторичных приборах с ФДД с осью двигателя через редуктор связывается второй ФДД (на рис. 2-18 не показан), служащий для выдачи информации для устройств регулирования в виде напряжения переменного тока.

Для систем телепередачи требуется еще включенный на выходную обмотку дополнительного ФДД преобразователь-усилитель переменного тока с выходом на постоянном токе.

Приборы с силовой компенсацией. В системах измерения, содержащих первичный преобразователь и вторичный прибор компенсационного типа (рис. 2-16 и

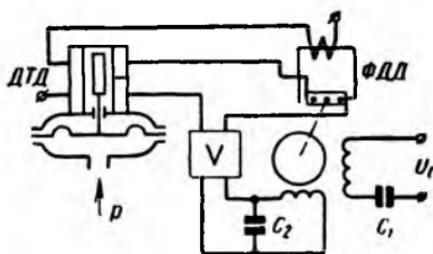


Рис. 2-18. Схема прибора с компенсационным ФДД.

2-18), не достигается требуемая точность, так как измерение производится при смещенных от нуля положениях мембран чувствительных элементов и якорей датчиков. Большая точность измерения достигается при таком методе компенсации, когда все деформирующиеся и перемещающиеся измерительные элементы принудительно возвращаются в исходное положение, благодаря чему исключаются ошибки, определяемые нелинейностью этих элементов. В связи с этим получили распространение первичные приборы, построенные по методу силовой компенсации.

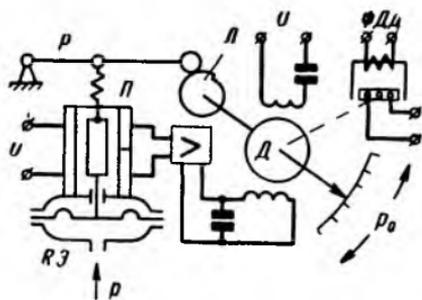


Рис. 2-19. Схема прибора с силовой компенсацией.

P — рычаг, Π — пружина, L — лекало.

В качестве примера рассмотрим устройство для измерения давлений жидкостей и газов (рис. 2-19). Такие приборы обычно выполняются со шкалой, имеющей нуль

посередине, что соответствует номинальному значению давления p_n . При отклонениях давления $\pm \Delta p$ стрелка смещается в обе стороны от нулевого положения. С чувствительным элементом датчика — мембраной связан якорь ДТД, укрепленный через пружину Π на рычаге. На этот рычаг воздействует лекало L , ось которого связана с осью двухфазного конденсаторного электродвигателя; на этой же оси насажена с одной стороны стрелка прибора, с другой — ферродинамический датчик. Настройка прибора производится так, что при давлении p_n мембрана, а с ней и якорь преобразователя устанавливаются посредством лекала в нулевое положение, а стрелка прибора — посередине шкалы. При изменении давления на величину $\pm \Delta p$ происходит деформация мембраны, а с ней и перемещение якоря. На выходе преобразователя включается электронный усилитель, с которого снимается напряжение, подводимое к обмотке управления двигателя. Последний поворачивает лекало до тех пор, пока э. д. с. на выходе ДТД не будет равна нулю, что соответствует нулевому положению мембраны и якоря.

Все устройство в целом устанавливается в месте замера параметра.

Для передачи информации на расстояние служит ферродинамический датчик ФДД, на рамке которого возникает э. д. с., пропорциональная углу поворота вала двигателя. Выход рамки включается на усилитель.

Компенсация по перемещению. Точное измерение больших линейных перемещений от 5 мм и выше не может быть осуществлено обычными схемами с ДИД и ДТД. Поэтому в таких случаях применяют схемы с компенсацией по перемещению: вместе с перемещаемой деталью сдвигается и датчик до тех пор, пока якорь его не установится в нейтральное положение.

Пример такого устройства приведен на рис. 2-20. По обе стороны перемещаемой детали D

монтируются оба магнитопровода дифференциального трансформаторного датчика, причем устанавливается начальный зазор δ_0 , одинаковый для обеих его частей.

Датчик в целом укрепляется на гайке Γ , связанной с ходовым винтом XB . При смещении детали на величину Δ на выходе датчика возникает э. д. с. ΔE , усиленное значение которой подводится к обмотке управления двигателя $Dв$, который поворачивает ходовой винт и перемещает гайку до момента, когда установится начальный зазор δ_0 между магнитопроводами и деталью.

Торзиометр — прибор для измерения крутящего момента на валу машины. Конструктивная и электрическая схемы торзиометра с применением двух дифференциально-трансформаторных датчиков приведены на рис. 2-21. На валу машины жестко насаживается зубчатый диск M , второй диск N , аналогичный первому по

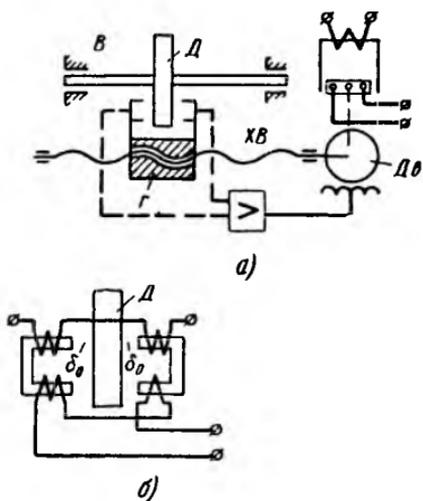


Рис. 2-20 Схема преобразователя с компенсацией по перемещению (а).

δ — схема ДТД; XB — ходовой винт, Γ — гайка, B — вал, D — деталь (якорь ДТД).

числу и профилю зубьев, насаживается на торсионную трубку T , жестко укрепленную в сечении N' . Под дисками монтируются ДТД A и B . При отсутствии нагрузки на валу зубцы обоих дисков изменяют выходные э. д. с. датчиков синфазно, и выходное напряжение на их встречно включенных вторичных обмотках равно нулю.

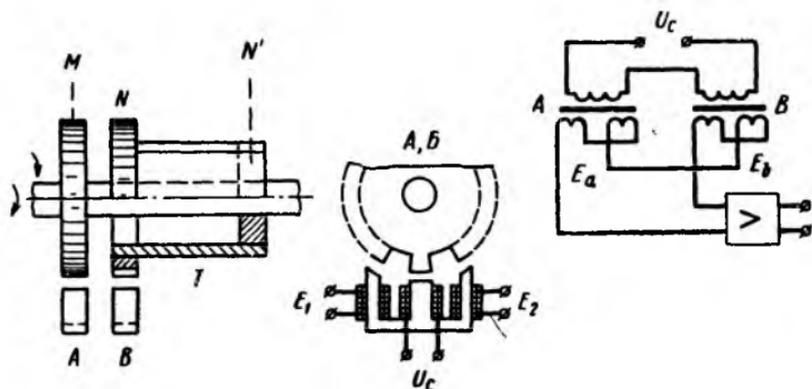


Рис. 2-21. Конструктивная и электрическая схемы торсионметра.

При наличии нагрузки возникает деформация скручивания вала. При этом зубцы диска N имеют угловое смещение по отношению к зубцам диска M , получается сдвиг по фазе между выходными значениями э. д. с. E_a и E_b обоих датчиков. Разность этих э. д. с. подается на усилитель и далее на вторичное измерительное устройство.

2-11. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для пояснения принципа действия преобразователей пропорциональной компенсационной системы рассмотрим пример устройства для измерения давления p газов или жидкостей (рис. 2-22). Все устройство состоит из двух частей: первичного прибора (датчика), установленного в месте осуществления замера давления, и вторичного—амперметра или вольтметра, монтируемых на щите. В некоторых случаях выходные данные первичного прибора подаются непосредственно на вход управляющих или информационных машин.

При наличии давления p деформируется мембрана чувствительного элемента на величину δ_1 , при этом перемещается якорь дифференциального трансформаторного датчика, на выходе которого получается э. д. с. E_d , пропорциональная δ_1 . Эта э. д. с. подается через усилитель среднего значения, преобразующий переменное напряжение в постоянный ток (см. схему рис. 2-5), на рамку преобразователя ток — сила магнитоэлектрической системы. Силой, развиваемой на рамке, якорь датчика, а с ним и мембрана возвращаются в исходное положение. Устройство работает по принципу силовой компенсации деформации мембраны, но компенсация получается неполной, на величину $\delta_2 - \delta_1$. Объясняется это тем, что для создания компенсационной силы на рамке требуется определенный ток в рамке, т. е. наличие некоторого смещения якоря датчика (ДТТ) от нейтрали.

Процесс измерения при наличии силовой компенсации происходит при весьма малых деформациях мембраны, благодаря этому выходная э. д. с. датчика, а следовательно, и ток в рамке пропорциональны этой деформации. При полной компенсации сила тока I пропорциональна δ_1 , а при неполной I_n — пропорциональна δ_2 .

Статизм систем определяется из соотношения

$$\sigma = \frac{I - I_n}{I}.$$

Выходной ток усилителя является аналогом измеряемого давления p .

Устройство выполняют так, чтобы получился выход по току, соответствующий по своим данным требованиям ГОСТ 9895-61, т. е. при изменении давления p от нуля до номинального сила тока должна изменяться в пределах от 0 до 5 *ма* (или от 0 до 20 *ма*). В некоторых случаях требуется выход «по напряжению» в пределах от 0 до 10 *в*. Для этого в цепи усилитель — рамка включает-

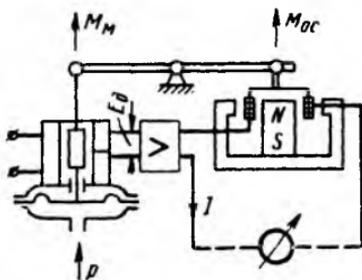


Рис. 2-22. Схема преобразователя давления с силовой компенсацией.

ся последовательно сопротивление $R = 2000 \text{ в}$, на зажимах которого получают при токе, равном 5 ма , напряжение, равное 10 в .

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 2-23. На чувствительный элемент действуют две силы: давление газа, создающее силу Q_1 и деформацию δ_1 , и сила, развиваемая на рамке Q_2 , компенсирующая деформацию на величину δ_2 . Якорь ДТД перемещается от нейтрали на величину $\delta_1 - \delta_2$. Выходное значение э. д. с. датчика подается на усилитель и далее на рамку преобразователя ток — перемещение.

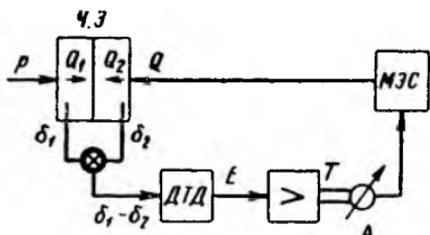


Рис. 2-23. Структурная схема компенсационного преобразователя типа «П».

Основные соотношения для определения статизма системы. Сила, действующая на мембрану:

$$Q_1 = pS = c\delta_1, \quad (2-9)$$

где S — эффективная площадь мембраны, см^2 ;
 c — ее жесткость, кгс/см .

Компенсирующая сила, создаваемая рамкой МЭС:

$$Q_2 = k_c I = c\delta_2, \quad (2-10)$$

где k_c — коэффициент преобразования МЭС, кгс/а .

Напряжение на выходе ДТД:

$$E_d = \alpha k_d (\delta_1 - \delta_2), \quad (2-11)$$

где α — коэффициент, учитывающий относительные колебания напряжения питания;

k_d — коэффициент преобразования датчика, в/см .

Уравнение усилителя

$$I = k_y E_d, \quad (2-12)$$

где k_y — крутизна характеристики усилителя, а/в .

Из (2-9) — (2-12) находим:

$$I = \frac{1}{\frac{c}{\alpha k_y k_d} + k_c} Q_1.$$

При полной компенсации, когда $\frac{c}{\alpha k_y k_d} \ll k_c$, получается характеристика интегральной системы:

$$I = \frac{Q_M}{k_c}.$$

Статизм системы

$$\sigma = \frac{I - I_{II}}{I} = \frac{\frac{1}{k_c} - \frac{1}{(c/\alpha k_y k_d) + k_c}}{1/k_c} = 1 - \frac{k_c}{k_c + \frac{c}{\alpha k_y k_d}}.$$

Таким образом, статизм системы тем меньше, чем больше k_c — коэффициент преобразования тока в силу, а также коэффициенты α , k_y , k_d . Соответствующим выбором коэффициентов системы получают величину статизма системы порядка 0,2—0,5%.

2-12. ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Большое распространение получили устройства для измерения весовых расходов жидкостей и газов посредством диафрагмы, установленной в трубе (рис. 2-24). При протекании жидкости или газа через диафрагму D на ней возникает перепад давлений. Давления p_1 (+) — до диафрагмы и p_2 (—) — после нее подаются на чувствительный элемент, выполненный в виде мембраны, деформация которой передается через рычажную систему на рычаг P .

Сила, вызванная действием перепада давлений $p_1 - p_2$ на мембрану, поворачивает рычаг против часовой стрелки. При этом якорь дифференциального трансформаторного датчика смещается от нейтрали, на выходе датчика возникает э. д. с. E_d , подаваемая на усилитель. Выходной ток усилителя поступает в обмотку преобразователя ток — сила. Моментом, создаваемым преобразователем, рычаг поворачивается по часовой стрелке,

чем осуществляется компенсация перемещения, создаваемого мембраной. В данном устройстве применен преобразователь ферродинамической системы, в котором сила на рамке пропорциональна квадрату тока. Выбор такой системы определяется стремлением получить линейную характеристику расходомера.

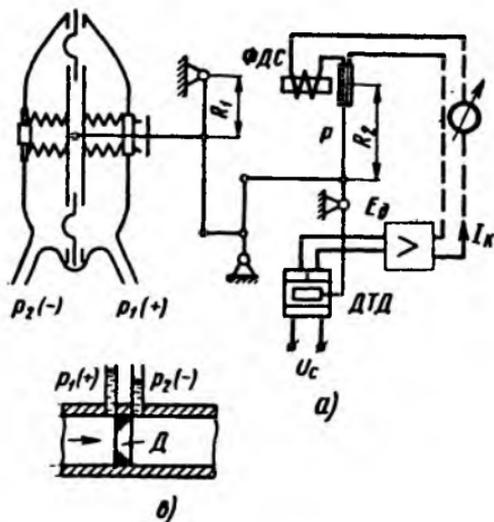


Рис. 2-24. Преобразователь с силовой компенсацией для измерения расходов жидкостей и газов.

a — конструктивная и электрическая схемы;
б — монтаж диафрагмы в трубопроводе.

Весовой расход жидкостей и газов пропорционален корню квадратному из перепада давлений:

$$G = k_0 \sqrt{p_1 - p_2}.$$

Момент, создаваемый мембраной, пропорционален квадрату расхода:

$$M_M = kG^2.$$

Момент, создаваемый рамкой,

$$M_P = k_p I^2.$$

Условие полной компенсации

$$M_M = M_P,$$

откуда следует:

$$I_p = \sqrt{\frac{k}{k_p}} G.$$

Пропорциональные системы преобразования нашли применение не только в случаях, когда перемещение рычага системы вызвано перемещением деталей чувствительных элементов, например мембран.

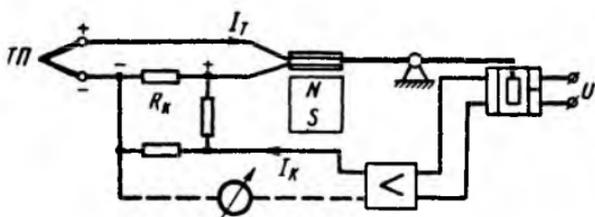


Рис. 2-25. Конструктивная схема преобразователя термо-э. д. с.
 ТП — термопара, R_k — компенсационное сопротивление.

Имеются приборы, выполненные так, что на вход устройства подается электрическая величина, в частности, сила тока.

В качестве примера приводим схему устройства, выполненного фирмой Аскания (ФРГ), для измерения температуры посредством термопар (рис. 2-25).

Ток термопары ТП поступает на рамку магнитоэлектрической системы. При повороте рычага системы смещается якорь дифференциального трансформаторного датчика и на его выходе возникает напряжение разбаланса. Это напряжение после усиления и преобразования в постоянный ток I_k подается на компенсационное сопротивление R_k . Ток I_k является выходной величиной преобразователя.

При такой схеме отпадает надобность в применении нормальных элементов, вибропреобразователей и реохордов, требуемых при построении обычных автоматических потенциометров.

Приборы с генераторами. В ряде компенсационных преобразователей в качестве индикатора отклонения рычага от нейтрального положения применяется высокоча-

стотный индуктивный датчик, включенный в схему генератора.

Одним из элементов разработанной в Советском Союзе электрической агрегатной унифицированной системы ЭАУС является электронно-механический преобразователь типа Э-2ДМ, предназначенный для непре-

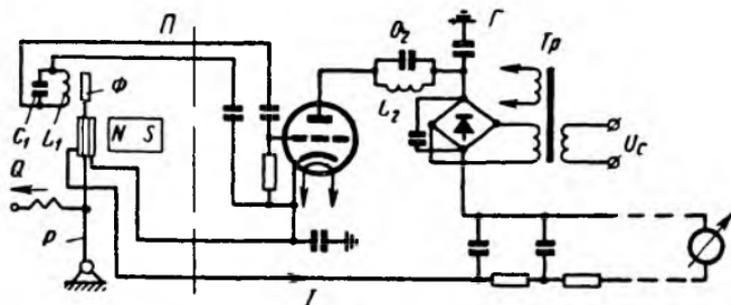


Рис. 2-26. Схема электромеханического преобразователя.
 П — преобразователь, Г — генератор с блоком питания, Ф — флажок.

рывного преобразования углового или линейного перемещения в пропорциональный сигнал постоянного тока.

Преобразователь (рис. 2-26) состоит из высокочастотного электронного генератора и преобразователя ток — сила магнитоэлектрической системы. Индуктивность L_1 и емкость C_1 в цепи сеточного смещения генератора вынесены в МЭС и расположены вблизи алюминиевого флажка Φ , укрепленного на рычаге P .

При повороте рычага P внешней силой Q , создаваемой, например, чувствительным элементом, перемещается флажок Φ , изменяется режим работы генератора и величина постоянного тока I в цепи его питания. Рамка МЭС обтекается выходным током, чем создается обратная связь в системе. Рычаг P возвращается в исходное положение с некоторым статизмом.

Рабочий диапазон изменения выходного тока 0,5—5 ма. Основная погрешность преобразования 0,5% при нормальной температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$; дополнительные погрешности, определяемые изменением температуры, колебаниями напряжения сети и вибрациями, значительны.

Для достижения более высокой точности требуется принимать особые конструктивные меры с целью повышения крутизны преобразования, увеличения механи-

ческих моментов на оси рамки, компенсации температурных влияний и т. п.

На рис. 2-27 приведен эскиз конструкции преобразователя, разработанного в ХПИ О. Н. Суетиным и Р. В. Васиным. Схема генератора этого преобразователя изображена на рис. 2-6.

Вместо одной магнитоэлектрической системы применены две, действующие согласно. Рычаг подвешен на двух перекрещивающихся пружинах, благодаря чему исключаются погрешности от момента трения. Приняты меры для уменьшения температурной погрешности.

Величина недокомпенсации по положению рычага подвижной системы при полном изменении входного сигнала достигает 50 мк, а при одиночной МЭС в преобразователе Э-2ДМ она равна 100 мк.

Электронпневматический преобразователь. Простейшая конструкция такого преобразователя, изображенная на рис. 2-22, не нашла применения из-за больших погрешностей, определяемых нелинейностью узла «сопло — заслонка».

Для получения высокой точности преобразования системы выполняют замкнутыми. На рис. 2-28 приведен пример такой системы. Входной ток I подается на рамку магнитоэлектрического преобразователя МЭС-1, связанную с якорем ДТД. На выходе катушек этого датчика возникает напряжение, которое после усиления и преобразования в постоянный ток подается на рамку второго преобразователя МЭС-2, управляющего расстоянием сопло — заслонка и выходным давлением p_v . Это же давление подается на чувствительный элемент обратной связи — мембрану M_1 , перемещающую катушки ДТД до момента компенсации смещения якоря (с некоторой недокомпенсацией, определяемой статизмом всей системы).

Статизм данной системы определяется как ошибка, представляющая собой разность между требуемым зна-

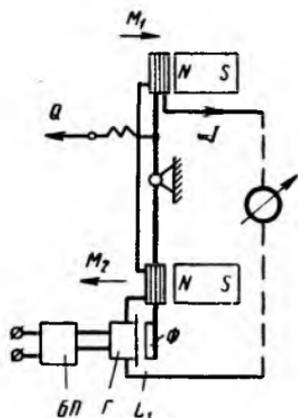


Рис. 2-27. Конструктивная схема электромеханического преобразователя ХПИ.

чением давления $p_{в.к}$ на выходе, при входном токе I и действительным $p_{в}$.

Коэффициент статизма представляет собой отношение полученной разности давлений к значению $p_{в.к}$:

$$\sigma = \frac{p_{в.к} - p_{в}}{p_{в.к}}$$

Для вычисления σ требуется установить параметры замкнутой системы и их взаимозависимость:

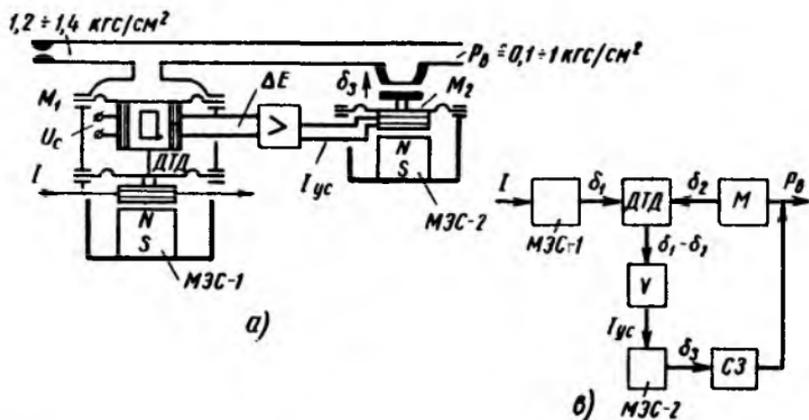


Рис. 2-28. Конструктивная и структурная схемы электропневматического компенсационного преобразователя.

а) перемещение рамки МЭС-1 и якоря ДТД:

$$\delta_1 = k_2 I,$$

где k_2 — коэффициент преобразования МЭС, $см/а$;

б) деформацию мембраны M_1 обратной связи и перемещение катушек ДТД:

$$\delta_2 = k_M p_{в},$$

где k_M — коэффициент преобразования мембраны, $см/(кгс/см^2)$;

в) выходное напряжение ДТД:

$$E_D = \alpha k_D (\delta_1 - \delta_2),$$

где k_D — коэффициент преобразования ДТД, $в/см$;

г) ток на выходе усилителя

$$I = k_y E_d,$$

где k_y — крутизна характеристики усилителя, a/v ;

д) выходное давление

$$p_v = k_c I,$$

где k_c — коэффициент преобразования системы сопло—заслонка и МЭС-2, $(кгс/см^2)/a$.

Из приведенных соотношений получаем:

$$p_v = I \frac{\alpha k_c k_y k_d k_a}{1 + \alpha k_c k_d k_y k_m}.$$

Давление $p_{в.к}$ при полной компенсации должно быть:

$$p_{в.к} = I \frac{k_v}{k_m}.$$

Коэффициент статизма равен:

$$\sigma = \frac{p_{в.к} - p_v}{p_{в.к}} = 1 - \frac{1}{\frac{1}{\alpha k_c k_y k_d k_a} + 1}.$$

2-13. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

При построении измерительных комплектов для целей измерения или автоматического регулирования технологических процессов встречаются случаи, когда требуется измерение не одного, а нескольких параметров с вычислением определенной функции. Так, автоматическое регулирование уровня воды в паровых котлах осуществляется в функции трех связанных определенным соотношением параметров: уровня воды, расходов воды и пара.

Измерение расхода газа производится не только в функции перепада давлений на диафрагме $G = k_0 \sqrt{\Delta p}$, но и вносится коррекция по нескольким коэффициентам, характеризующим давление газа k_p , температуру k_T , влажность k_B .

Общее соотношение для вычисления расхода газа:

$$G = k_0 \sqrt{\frac{k_p}{k_T k_n} \Delta p}.$$

Коэффициент полезного действия парового котла определяется по формуле

$$\eta = \frac{H_{\text{п}} - H_{\text{в}}}{H_{\text{т}}},$$

где $H_{\text{п}}$, $H_{\text{в}}$, $H_{\text{т}}$ — тепло, содержащееся в вырабатываемом паре, подводимой воде и подводимом топливе соответственно. Указанные значения теплосодержания вычисляются по данным измерения температуры, давления и расхода.

Для получения требуемых соотношений производят необходимые вычислительные операции с данными, полученными от измерителей: сложение, вычитание, умножение, деление, извлечение корня, возведение в квадрат.

Преобразование измеряемых параметров производится чаще всего ДТД или ФДД, и вычислительные операции могут быть произведены непосредственно на этих датчиках. Для этого все датчики схемы должны быть полностью идентичными по своим характеристикам.

При проведении вычислений требуется учитывать удельное значение каждого из параметров. Поэтому выходной сигнал каждого из измерительных датчиков снимается с делителя напряжения, включенного на вторичную обмотку ДТД или рамку ФДД. При суммировании выбор коэффициентов k , характеризующих удельное влияние параметров, производится так, чтобы суммарное значение всех коэффициентов было равно единице.

Так, если требуется суммировать значения трех параметров $Q + Q_2 + Q_3$, то соответствующие коэффициенты выбирают из следующих соотношений:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3; \quad k_1 = \frac{Q}{Q_c};$$

$$k_2 = \frac{Q_2}{Q_c}; \quad k_3 = \frac{Q_3}{Q_c};$$

тогда

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1,$$

Суммарный выходной сигнал измерительной схемы подается на схему измерения или регулирования, в первом случае на компенсационный датчик Δ_k (см. рис. 2-29,а), во втором на задатчик $\Delta_{зд}$ с жестко зафиксированным положением сердечника (рис. 2-29,б).

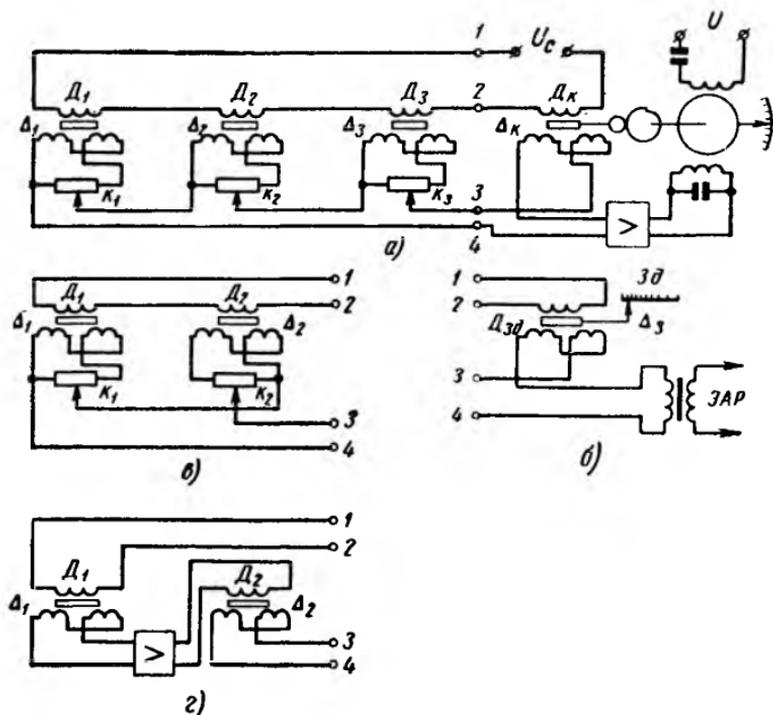


Рис. 2-29. Вычислительные схемы с применением ДТД.

Напряжения, получаемые на выходах делителей напряжения датчиков, равны:

$$\text{для ДТД: } \Delta E = k_d k U_c \Delta;$$

$$\text{для ФДД (рис. 2-30): } \Delta E = k_d k U_c \alpha,$$

где k_d — коэффициент преобразования датчика;

k — коэффициент, устанавливаемый делителем;

U_c — напряжение питания первичной обмотки датчика;

Δ — смещение якоря ДТД от нейтрали;

α — угол поворота рамки ФДД.

Примерные схемы с ДТД приведены на рис. 2-29.

а) Сложение (рис. 2-29,а). Производится сложение трех параметров; коэффициенты этих параметров: k_1 , k_2 , k_3 устанавливаются на делителях напряжения. Выход схемы подается на компенсационный преобразователь и через усилитель на обмотку управления двигателем.

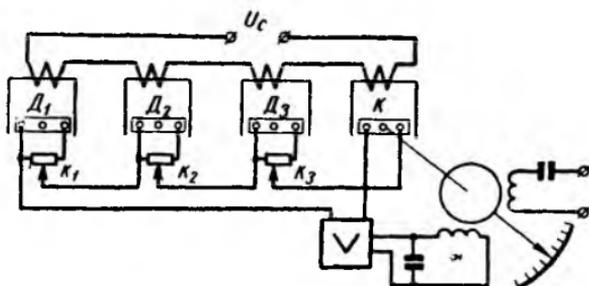


Рис. 2-30. Схема сложения с применением ФДД. D_1 , D_2 , D_3 — измерительные датчики; K — компенсационный датчик.

Уравнение сложения:

$$k_d U_c (k_1 \Delta_1 + k_2 \Delta_2 + k_3 \Delta_3) = k_d U_c \Delta_K;$$

Отсюда

$$\Delta_K = k_1 \Delta_1 + k_2 \Delta_2 + k_3 \Delta_3.$$

В системах автоматического регулирования выход схемы подается на задатчик, которым задается требуемое значение результирующего параметра (рис. 2-29,б). Общий выход — разность напряжений измерительных преобразователей и задатчика — подается через трансформатор Tr на схему автоматического регулятора.

б) Вычитание (рис. 2-29,в). Выход D_1 включается встречно выводу D_2 .

Уравнение вычитания

$$\Delta_K = k_1 \Delta_1 - k_2 \Delta_2.$$

в) Умножение (рис. 2-29, г). Выход D_1 через усилитель с коэффициентом усиления k_y подается на первичную обмотку D_2 . Напряжение на выходе D_1 равно: $\Delta E_1 = k_1 k_d U_c \Delta_1$. Напряжение на выходе D_2 равно: $\Delta E_2 = \Delta E_1 k_y k_2 k_d \Delta_2 = k_d^2 k_1 k_2 k_y U_c \Delta_1 \Delta_2$.

При компенсации напряжения ΔE_2 напряжением, снимаемым с компенсационного датчика D_K , получаем:

$$k_d^2 k_y k_1 k_2 U_c \Delta_1 \Delta_2 = k_d U_c \Delta_K$$

или

$$k_1 k_2 k_y k_d \Delta_1 \Delta_2 = \Delta_K.$$

Соответствующим сочетанием измерительных датчиков осуществляют и другие схемы вычисления.

Схема сложения с ФДД приведена на рис. 2-30. В [Л.2] подробно рассмотрены другие схемы с ФДД.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

При разработке электромеханических датчиков и преобразователей учитывается ряд факторов, определяющих выбор принципа действия датчика, его конструктивных форм и размеров.

Электромеханические датчики применяются в разнообразных устройствах автоматического контроля и управления. Это обстоятельство вызвало необходимость разработки большого числа видов и конструктивных форм датчиков, которые должны быть, с одной стороны, выполнены так, чтобы получилось наиболее удобное сочетание датчика с другими элементами измерительного комплекта, а с другой — удовлетворялись требования в отношении чувствительности, точности и технологичности.

Расчет электромеханических датчиков сводится в основном к расчету магнитных цепей со сталью.

3-1. НАПРЯЖЕНИЕ И ЧАСТОТА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДАТЧИКОВ

Напряжение. Питание измерительных комплектов с электромеханическими датчиками осуществляется обычно от сети переменного тока 50 гц, 127 в или 220 в.

Напряжение питания катушек датчиков бывает различным. Так, при последовательном включении двух датчиков катушки включают на напряжение 127 в. В ря-

де случаев применяют меньшие напряжения, например 3, 6, 10, 25 и 36 в, включая катушки через понижающий трансформатор.

Во всех случаях желательно выбирать напряжение питания и данные катушек так, чтобы диаметр обмоточного провода был не менее 0,1 мм. Намотка катушек с меньшим диаметром сопряжена с понижением их надежности и технологическими трудностями из-за частых обрывов проволоки, получающихся в процессе намотки. Однако от указанного условия приходится отступать при изготовлении катушек магнитоиндукционных датчиков и магнитоэлектрических систем, в которых требуется разместить большое число витков при малых размерах катушки или рамки. В данном случае применяется проволока диаметром 0,06 или 0,08 мм.

Частота источника питания. Обычно стремятся выполнить датчики с питанием катушек от сети с частотой 50 гц. В отдельных случаях приходится принимать источники питания повышенной частоты: 400, 1 000 и 2 000 гц, используя для этих целей стандартные машинные генераторы или специальные ламповые или полупроводниковые генераторы.

Выбор повышенных частот определяется в основном требованиями повышения чувствительности и точности работы датчика, его режимом работы и необходимостью уменьшения влияния вибраций якоря и электромеханических сил, воздействующих на якорь.

Изменение реактивного сопротивления индуктивных датчиков, выходного напряжения дифференциальных трансформаторных и ферродинамических датчиков пропорционально частоте. Таким образом, с увеличением частоты источника питания повышается коэффициент преобразования датчика.

Следует учитывать, что с увеличением частоты увеличиваются и активные потери в стали, приводящие к снижению чувствительности.

При расчете датчика можно установить оптимальное значение частоты, построив кривую зависимости коэффициента преобразования от частоты (рис. 3-1).

При частоте $f_{\text{опт}}$ получаются условия наибольшей стабильности характеристик датчика при колебаниях частоты, так как кривая $k_d = k(f)$ в этой точке проходит наиболее полого.

Точность устройства, определяемая в основном линейностью преобразования, получается более высокой при повышенных частотах. Кроме того, с увеличением частоты удельное влияние омического сопротивления катушек соответственно уменьшается, что приводит к большей точности и линейности выходной характеристики.

Различают статический и динамический режимы работы датчика.

Статическим режимом работы считается такой, при котором скорость перемещения якоря весьма мала.

Динамический режим работы датчика характеризуется большой частотой изменения положения якоря. Это имеет место, например, при построении приборов для измерения крутильных колебаний коленчатых валов, эксцентрицитета валов крупных машин и других.



Рис. 3-1. Зависимость коэффициента преобразования датчика от частоты питания.

При работе трансформаторного датчика в динамическом режиме в его вторичных обмотках возникает не только трансформаторная э. д. с. E_T , определяемая изменением положения якоря, но и генераторная э. д. с. E_G , определяемая изменением потокоцепления вторичной обмотки при перемещении якоря с той или иной скоростью.

При статических измерениях зазоры в магнитопроводе меняются от начального значения δ_0 до $\delta_0 + \Delta$, а при работе в динамическом режиме по закону

$$\delta = \delta_0 + \Delta \sin 2\pi f_M t,$$

где f_M — частота перемещения якоря.

При таком законе изменения зазора в кривой мгновенных значений э. д. с. появляется гармоническая составляющая с периодом, отличным от периода частоты питающего напряжения, что приводит к амплитудной и фазовой погрешностям выходного значения э. д. с. Уменьшение этих погрешностей достигается увеличением частоты источника питания сети f_c . Так, при измерении эксцентрицитета валов паровых турбин, вращающихся со скоростью вращения 3 000 об/мин, значение $f_M = 50$ гц, а частоту питания датчиков принимают порядка

1 000 гц. При этом погрешность, определяемая возникающими генераторными э. д. с., снижается до 0,5%.

Возникающие на якоре датчиков электромеханические силы пульсируют с частотой, равной двойной частоте источника питания. Для того чтобы вибрации якоря под влиянием этих сил были невелики, частота источника питания катушек принимается на порядок большей собственной частоты колебаний подвижной части датчика.

3-2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

Выбор материала для магнитных систем индуктивных, трансформаторных и ферродинамических датчиков определяется в основном из условия минимальных потерь от гистерезиса и вихревых токов, так как эти потери вносят погрешности в работу устройства.

Для плоских индуктивных, трансформаторных, а также для ферродинамических датчиков применяются шихтованные магнитные системы из листовой электротехнической стали, а при частотах свыше 1 000 гц — из пермаллоя.

Толщина листов стали или пермаллоя принимается в зависимости от частоты сети с учетом глубины проникновения h переменного магнитного поля.

Величина h определяется как толщина поверхностного слоя стали, через который при равномерном распределении индукции B , равной индукции на поверхности пластины, проходит магнитный поток, равный действительному, неравномерно распределенному по всей пластине.

Значение h может быть определено по формуле Штейнмеца

$$h = 5 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ [мм]},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{см}$;
 μ — магнитная проницаемость материала;
 f — частота, гц.

В табл. 3-1 приводятся данные h для некоторых видов материалов.

Значения глубины проникновения поля h , мм

| Материал | При частотах, гц | | |
|--|------------------|-------|-------|
| | 50 | 500 | 5 000 |
| Сталь мягкая | 0,38 | 0,12 | — |
| Кремнистая сталь (1% Si) | 0,60 | 0,19 | — |
| Электротехническая сталь, Э3 | 0,775 | 0,245 | — |
| Электротехническая сталь, Э4 | 0,93 | 0,3 | 0,093 |

Магнитопровод должен выполняться из листов, толщина которых не превосходит двойной величины h :

$$\delta \leq 2h.$$

Магнитопровод и якорь цилиндрических датчиков выполняются по конструктивным соображениям обычно сплошными и величину индукции принимают небольшой. При питании катушки возбуждения напряжением промышленной частоты 50 гц применяют кремнистую сталь, при более высоких частотах 400, 500 гц необходимо применять пермаллой.

Особое внимание уделяется выбору материалов для датчиков, установленных в местах с высокой температурой. Так, при контроле работы паровых турбин температура в месте установки датчика может достигать 500° С. В таких случаях применяют специальные сплавы с высокой точкой Кюри, например сплав 52% Ni, 1% Cr, ост. Fe. Для катушек таких датчиков применяется обмоточная медь с высокотемпературной изоляцией. Нашей промышленностью выпускается изолированная проволока с допускаемой температурой нагрева до 500° С.

В некоторых конструкциях якорем системы является сплошной диск, вращающийся с большой скоростью. Для уменьшения величин вихревых токов, наводимых в диске, последний выполняют из стали, обладающей высоким электрическим удельным сопротивлением, например из инвара, у которого $\rho = 74 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

При построении малогабаритных высокочастотных дифференциальных трансформаторных датчиков применяют магнитопровод и сердечник из высокочастотного феррита, например марки Ф-600 и Ф-1 000. Такие магнитопроводы выпускаются прессованными и широко применяются в радиотехнике.

3-3. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Задачей расчета магнитных систем электромеханических ферромагнитных датчиков и преобразователей является определение основных характеристик этих устройств: выходных значений э. д. с. в дифференциально-трансформаторных, ферродинамических, магнитоиндукционных датчиках, сил и моментов в магнитоэлектрических системах преобразователей ток — перемещение и других.

Вопросы расчета магнитных систем подробно освещены в литературе [Л. 6 и 7].

Ниже приводятся только общие данные, связанные с расчетом датчиков и преобразователей.

Магнитные проводимости воздушных зазоров. Магнитное сопротивление всей цепи магнитопровода определяется суммой магнитных сопротивлений всех участков стали и воздушных зазоров. В целях упрощения расчетов обычно не учитывают падения магнитного напряжения в стали, величины относительно малой в магнитопроводах с большими зазорами. При проведении расчетов чаще всего пользуются не величиной R_μ — магнитного сопротивления, а величиной, обратной ей: магнитной проводимостью G .

Общая формула для определения проводимости между двумя плоскостями — площадью S (m^2) с воздушным зазором δ (m)

$$G = \mu_0 \frac{S}{\delta} \quad [гн], \quad (3-1)$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ гн/м — магнитная постоянная.

Формула (3-1) пригодна только для плоскопараллельного поля. Фактически же поле в зазоре не является плоскопараллельным: даже поле между двумя параллельными плоскостями состоит из основного поля, плоскопараллельного, и краевого поля выпучивания.

Для более точного определения значения G пользуются различными методами, чаще всего методом разбивки поля на простые геометрические фигуры, для которых по формуле (3-1) могут быть определены формулы проводимостей.

Схема замещения магнитной цепи. При расчете сложных разветвленных магнитопроводов для удобства опре-

деления требуемых соотношений составляют схему замещения магнитной цепи, причем ее изображение аналогично изображению электрической схемы.

Источник м. д. с. $F = Iw$ изображается в виде кружка, магнитные проводимости — в виде прямоугольников.

При построении схем для датчиков в дальнейшем не учитываются падения магнитного потенциала в стали.

Рассмотрим примеры построения схем замещения.

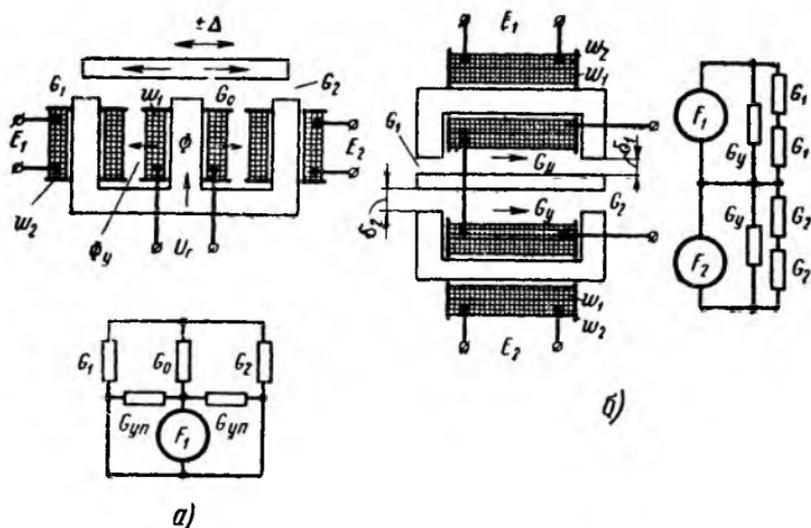


Рис. 3-2. Дифференциально-трансформаторные датчики.

1) Магнитная система по рис. 3-2,а. Проводимости: G_0 — от среднего сердечника к якорю, G_1 , G_2 — от крайних полюсов к якорю,

$$G_{y.n} = g \frac{l}{3} \text{ — приведенная проводимость потоков рассеяния } \Phi_y, \text{ где } g \text{ — удельная проводимость утечки на 1 м длины сердечника, } l \text{ — длина сердечника (приблизительно считают, что высота катушки равна длине сердечника).}$$

Уменьшение проводимости в 3 раза против вычисленной по геометрическим размерам $G_y = gl$ определяется тем, что не все магнитные линии потока рассеяния сцепляются со всеми витками катушки.

Схема замещения, соответствующая геометрии системы, показана на этом же рисунке.

Схема замещения, соответствующая геометрии системы, показана на этом же рисунке.

Полное значение проводимости всей системы для потока Φ определяется по схеме

$$G = \frac{G_0(G_1 + G_2)}{G_0 + G_1 + G_2} + 2G_{y.п.}$$

Индуктивность катушки ω_1

$$L = \omega_1^2 G \text{ [гН]}.$$

Ток в первичной обмотке

$$i = \frac{\dot{U}}{r + j\omega L}.$$

2) Магнитная система по рис. 3-2,б. Проводимость G_y , вычисленная по геометрическим размерам, в дальнейших расчетах не уменьшается в 3 раза, как это принято в примере 1, так как в данном случае весь поток рассеяния Φ_y сцепляется со всеми витками катушек.

Обе первичные катушки ω_1 включены последовательно, и для каждой из них учитывается м. д. с.: $F_1 = I\omega_1$.

Проводимости верхнего и нижнего магнитопроводов:

$$G'_1 = 0,5G_1 + G_y; \quad G'_2 = 0,5G_2 + G_y.$$

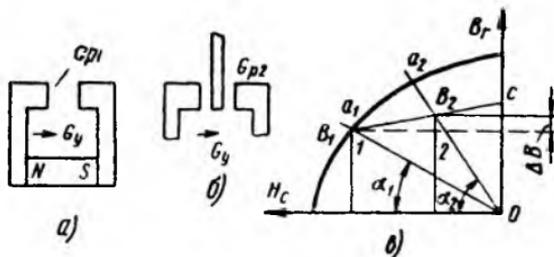


Рис. 3-3. Эскизы систем с постоянными магнитами и кривая размагничивания магнита.

Индуктивность первичной цепи $L = \omega_1^2(G'_1 + G'_2) = \omega_1^2 G$.

Ток в первичных обмотках определяется с учетом суммарного активного сопротивления обеих обмоток.

Цепи с постоянными магнитами. Расчет цепей с постоянными магнитами производится графически по кривой размагничивания (рис. 3-3,в).

В замкнутом тороиде поле магнита определяется величиной остаточной индукции:

$$\Phi_M = B_r S_M [\text{вб}],$$

где B_r — значение остаточной индукции, тл;
 S_M — площадь сечения тороида, м².

При наличии воздушного зазора в цепи магнита (рис. 3-3,а) значение B_r снижается до B_1 . Точка B_1 определяется углом α_1 , причем

$$\alpha_1 = \text{arctg} \frac{L_M}{S_M} G_1,$$

где G_1 — полная проводимость воздушных зазоров, складывающаяся из проводимости рабочего зазора G_{p1} и проводимости рассеяния G_y : $G_1 = G_{p1} + G_y$;

L_M — длина магнита.

Коэффициент рассеяния, определяющий отношение полного потока магнита к потоку в рабочем воздушном зазоре,

$$\sigma_1 = \frac{G_{p1} + G_y}{G_{p1}}.$$

Поток в рабочем зазоре

$$\Phi_p = \frac{B_1 S_M}{\sigma}.$$

В магнитно-индукционных датчиках поле постоянно магнита изменяется вследствие вхождения в зазор ферромагнитного тела (рис. 3-3,б).

Проводимость G увеличивается от G_1 до G_2 , где

$$G_2 = G_{p2} + G_y.$$

Изменение индукции происходит по кривой возврата a_1c . На пересечении линий Oa_2 и a_1c находят точку B_2 , соответствующую новому значению индукции. При выходе детали из зазора индукция от значения B_2 снова достигает значения B_1 .

Все указанные построения производятся при расчете цепи при условии, что постоянный магнит намагничи-

вается в собранном магнитопроводе. При намагничивании магнита отдельно и монтаже его после этого в магнитопровод получаются другие условия [Л. 7].

Определение размеров постоянного магнита производится по заданным параметрам устройства: проводимости рабочего зазора и индукции в рабочей части. При выборе материала магнита учитываются условия оптимального режима работы, т. е. такого, при котором получаются максимальное использование магнита — значение свободной магнитной энергии W получается наибольшим (см. рис. 3-4). Это приводит к уменьшению размеров магнита.

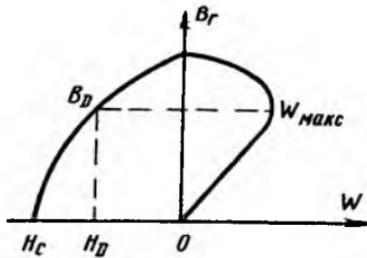


Рис. 3-4. Характеристики постоянных магнитов.

Индукция в средней части магнита и напряженность поля, соответствующие этому режиму, обозначаются B_D, H_D .

При расчете учитывается не только проводимость рабочего зазора, но и коэффициент рассеяния, значение которого получается порядка $\sigma = 2,5 \div 5$.

Размеры магнита определяются из двух уравнений: уравнение потока

$$\Phi_m = B_D S_m = B_p S_p \sigma; S_m = \frac{B_p S_p \sigma}{B_D}$$

и уравнение м. д. с.

$$H_D L_m = \frac{B_p \delta}{\mu_0} c_1, L_m = \frac{c_1 B_p \delta}{\mu_0 H_D},$$

где S_p и δ — площадь и длина рабочего зазора;

B_p — индукция в рабочем зазоре;

c_1 — коэффициент, учитывающий падение м. д. с. в стальных участках магнитопровода.

Электромагнитные силы. В электромеханических датчиках возникают силы на якоре индуктивных и трансформаторных систем, на рамках ферродинамических и магнитоэлектрических систем. Эти силы могут привести к искажению результатов измерения. Так, если якорь

датчика связан с чувствительными элементами — мембраной или сильфоном, то силы на якоре изменяют величину деформации этих элементов.

Работа преобразователей ток — перемещение основана на возникновении сил на рамке или якоре и в данном случае стремятся к получению максимальных значений сил.

Имеющиеся соотношения для вычисления электромагнитных сил выведены на основе двух физических явлений:

а) притяжения одного ферромагнитного тела к другому при наличии магнитного поля между ними (притяжение двух ферромагнитных тел);

б) взаимодействия тока катушки с полем магнитной системы.

Механическая работа перемещения подвижного тела к неподвижному производится за счет изменения подведенной из сети магнитной энергии.

Сила притяжения

$$Q = - \frac{dW}{dX},$$

где X — положение перемещающейся детали (зазор δ).

При плоских параллельных полюсах (как это имеет место в индуктивных и трансформаторных плоских датчиках) сила находится по формуле Максвелла.

$$Q = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{S} \text{ [кгс]},$$

где Φ поток, вб; S — площадь полюса, м².

По этой формуле получают относительно точные результаты при зазоре $\delta \leq 1$ мм, при больших зазорах погрешность вычислений значительно увеличивается (до 10%). Сила воздействия одного полюса магнитопровода на другой определяется в основном потоком Φ_p , пронизывающим воздушный зазор по площади S полюса (см. рис. 3-5,а). Поэтому при вычислении значения Q не учитывается краевой поток Φ_k (поток выпучивания). При этом вводится коэффициент рассеяния по краевому

поток, который представляет собой отношение полного потока магнитопровода Φ к рабочему Φ_p :

$$\sigma_k = \frac{\Phi}{\Phi_p} = \frac{G_p + G_k}{G_p},$$

где G_p — магнитная проводимость для рабочего потока (по площади S);

G_k — для краевого.

Учитывая σ_k , получаем:

$$Q = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{\sigma_k^2 S} \text{ [кгс]}.$$

В магнитных системах переменного тока учитывается среднее значение силы за период

$$Q_c = 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{\sigma_k^2 S} \text{ [кгс]}.$$

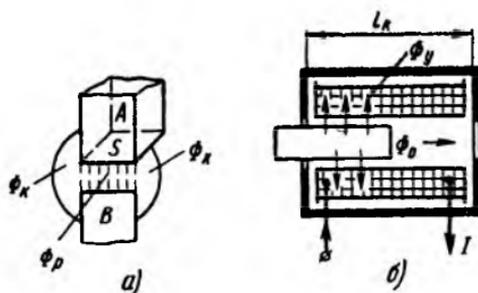


Рис. 3-5. Эскизы к расчету электро-механических сил в датчиках.

Примеры:

а) Одинарный индуктивный датчик (рис. 1-1). Поток в магнитопроводе Φ , якорь притягивается к полюсам силами воздействия обоих полюсов:

$$Q_c = 2 \cdot 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{\sigma_k^2 S} \text{ [кгс]}.$$

б) Дифференциальный индуктивный датчик (рис. 1-4). Данные верхней части магнитопровода: поток Φ_1 , зазор

δ_1 , коэффициент рассеяния $\sigma_{к1}$, сила притяжения якоря Q_1 .

Данные нижней части магнитопровода: Φ_2 , δ_2 , $\sigma_{к2}$, Q_2 . Обе силы действуют на якорь в противоположных направлениях. Если зазор $\delta_1 < \delta_2$, то результирующая сила направлена вверх:

$$Q_p = Q_1 - Q_2.$$

в) Цилиндрические датчики (рис. 3-5, б). В цилиндрических датчиках сила на якоре определяется взаимодействием магнитного поля Φ_y между якорем и наружным кожухом и током катушки.

Для систем переменного тока учитывается среднее значение силы за период

$$Q_c \approx \frac{0,102}{\sqrt{2}} \Phi_y H \text{ [кгс]},$$

где $H = I\omega/l_k$; l_k — длина катушки, м.

В дифференциальных системах (см. рис. 1-5 и 1-9) на якорь действуют две силы в противоположных направлениях. Результирующая сила получается незначительной, порядка 1—2 гс.

г) Ферродинамические датчики — ФДД (рис. 1-11). В ФДД момент на рамке получается благодаря взаимодействию потока в рабочем зазоре и тока I в рамке. Для переменного тока (ФДД работает только лишь как система переменного тока) учитывается среднее значение момента за период.

$$M = \frac{0,102}{\sqrt{2}} 2B_p \omega_p b I_p R_p \text{ [кгс} \cdot \text{м]},$$

где B_p — амплитудное значение индукции в средней части зазора между полюсом и сердечником, тл;

b — активная часть длины витка, пронизываемая потоком, м;

ω_p — число витков рамки;

R_p — средний радиус рамки, м.

д) преобразователи с магнитоэлектрической системой (рис. 3-15).

Сила Q_p на рамке

$$Q_p = 0,102 B_p l_p \omega_p I_p \text{ [кгс]},$$

где l_p — средняя длина витка рамки.

3-4. ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЯКОРЯ В ПЛОСКИХ ИНДУКТИВНЫХ И ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ДАТЧИКАХ

При выполнении дифференциальных индуктивных и трансформаторных датчиков величина начального зазора δ_0 между якорем и магнитопроводом принимается в зависимости от предельного значения Δ_M перемещения якоря. Максимальную и минимальную величину зазоров

$$\delta_{\text{макс}} = \delta_0 + \Delta_M; \quad \delta_{\text{мин}} = \delta_0 - \Delta_M$$

выбирают из условия получения линейной зависимости выходного значения тока или напряжения в функции перемещения. Линейность достигается, когда величина Δ_M в несколько раз меньше δ_0 . Коэффициент использования воздушного зазора

$$k = \frac{\Delta_M}{\delta_0}$$

принимается обычно в пределах 0,25—0,35.

Магнитные системы, изображенные на рис. 1-4, 1-7,а, 1-8,а, применимы при величинах Δ_M до ± 4 мм. При больших перемещениях требуются другие конструктивные исполнения, например изображенное на рис. 1-7,б.

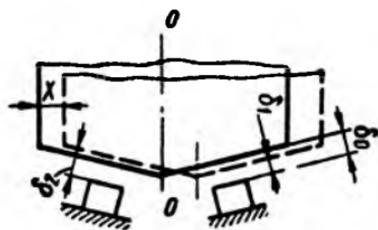


Рис. 3-6. Устройство ДТД для измерения больших линейных перемещений.

При перемещениях якоря вправо или влево величина зазора δ_0 остается постоянной, а изменяется размер площади между якорем и полюсами. Значение Δ_M определяется шириной b полюса. Требуется выдержать условие $\Delta_M < b$.

Другой пример датчика больших перемещений, используемого для измерения удлинения корпусов паровых турбин в пределах 50—100 мм, приведен на рис. 3-6.

С корпусом турбины связана деталь конической формы, играющая роль якоря. Магнитопровод, укрепленный на фундаменте, состоит из двух частей (I и II). В исходном положении (0—0) якорь расположен симметрично по отношению к обеим частям датчика. Величина зазо-

ров $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$. При смещении якоря на величину X , например вправо, уменьшается зазор δ_1 и увеличивается δ_2 :

$$\delta_1 = \delta_0 - \Delta = \delta_0 - X \sin \alpha;$$

$$\delta_2 = \delta_0 + X \sin \alpha.$$

При этом увеличивается магнитная проводимость G_1 части датчика I и уменьшается проводимость G_2 части II. Величина угла α выбирается в зависимости от заданного предельного перемещения. Так, при $X_m = 50$ мм принимают $\alpha = 1^\circ$. Тогда $\Delta_m = 50 \cdot 0,01745 = 0,87$ мм. Величина δ_0 принята равной 3 мм.

3-5. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛОСКИХ ДАТЧИКОВ

Магнитопроводы плоских индуктивных и трансформаторных датчиков выполняются Ш-образной и П-образной форм.

При выборе формы магнитопровода следует учитывать величину коэффициента рассеяния σ , системы: чем выше этот коэффициент, тем меньше чувствительность преобразователя. Предпочтительно применять магнитопроводы П-образной формы, в которых значение σ значительно меньше по сравнению с формой Ш. Однако в ряде случаев по конструктивным условиям принимают Ш-образные сердечники.

Задачей расчета является определение основных параметров датчика.

Дифференциальные индуктивные датчики — ДИД (рис. 1-4).

Обычно обмотки датчиков включаются по мостовой схеме, и задачей расчета является вычисление полных сопротивлений обоих плеч датчика.

а) Величины воздушных зазоров.

При нейтральном положении якоря:

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_0.$$

При смещенном на величину Δ :

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta; \quad \delta_2 = \delta_0 - \Delta.$$

б) Проводимости воздушных зазоров при δ_0

$$G_1 = G_2 = G_0.$$

При смещении якоря:

$$G_1 = G_0 + \Delta G_1; \quad G_2 = G_0 - \Delta G_2.$$

Для одного магнитопровода полная проводимость с учетом проводимости рассеяния

$$G'_1 = 0,5(G_0 + \Delta G_1) + G_y;$$

для второго

$$G'_2 = 0,5(G_0 - \Delta G_2) + G_y.$$

в) Индуктивности и полные сопротивления катушек:

$$L_1 = \omega_1^2 G'_1; \quad L_2 = \omega_2^2 G'_2;$$

$$Z_1 = r_1 + j\omega L_1; \quad Z_2 = r_2 + j\omega L_2.$$

Дифференциальные трансформаторные датчики — ДТД

Имеется два основных вида ДТД: с отдельными первичными катушками и с общей.

ДТД с отдельными первичными катушками (см. рис. 3-2,б).

а) Поток. В первом магнитопроводе

$$\Phi_1 = \sqrt{2}I\omega_1(0,5G_1 + G_y),$$

во втором

$$\Phi_2 = \sqrt{2}I\omega_1(0,5G_2 + G_y);$$

б) Э. д. с. на выходе катушек:

$$E_1 = \omega I \omega_1 \omega_2 (0,5G_1 + G_y);$$

$$E_2 = \omega I \omega_1 \omega_2 (0,5G_2 + G_y).$$

Учитывая

$$G_1 = G_0 + \Delta G_1; \quad G_2 = G_0 - \Delta G_2,$$

получаем при встречном включении вторичных катушек:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0,5\omega I \omega_1 \omega_2 (\Delta G_1 + \Delta G_2).$$

При незначительных перемещениях Δ

$$\Delta G_1 = \Delta G_2 = k\Delta.$$

В этом случае

$$\Delta E = k\omega I \omega_1 \omega_2 \Delta.$$

в) Ток I в первичных катушках

$$I = \frac{\dot{U}_c}{2r + j\omega\omega_1^2(0,5G_1 + 0,5G_2 + 2G_y)},$$

где r — омическое сопротивление каждой из катушек.

ДТД с общей первичной катушкой. Формы магнитопровода таких датчиков приведены на рис. 1-7,б и 1-8,в, г, д. Для получения расчетных соотношений принимаем магнитную систему с постоянной длиной зазоров (рис. 3-2,а).

а) Магнитные проводимости полюсов: среднего полюса G_0 ; крайних G_1 и G_2 ; между сердечниками $G_{y.п.}$.

При симметричном положении якоря

$$G_1 = G_2 = G_{к0}.$$

При смещении якоря, например влево,

$$G_1 = G_{к0} + \Delta G_1; \quad G_2 = G_{к0} - \Delta G_2.$$

По схеме замещения общая проводимость

$$G = \frac{G_0(G_1 + G_2)}{G_0 + G_1 + G_2} + 2G_{y.п.}$$

б) Магнитные потоки. Величина потока у основания среднего сердечника складывается из потока, протекающего через воздушные зазоры полюсов, и из потоков утечки от среднего сердечника к крайним:

$$\Phi = \Phi_{p0} + 2\Phi_y;$$

$$\Phi_{p0} = \sqrt{2}I\omega_1 \frac{G_0(G_1 + G_2)}{G_0 + G_1 + G_2}; \quad \Phi_y = \sqrt{2}I\omega_1 G_{y.п.};$$

$$\Phi_{p1} = \Phi_{p0} \frac{G_1}{G_1 + G_2}; \quad \Phi_{p2} = \Phi_{p0} \frac{G_2}{G_1 + G_2}.$$

в) Полное число потокосцеплений каждой из катушек

$$\Psi_1 = \omega_2 (\Phi_{p1} + \Phi_y); \quad \Psi_2 = \omega_2 (\Phi_{p2} + \Phi_y).$$

г) Электродвижущая сила на выходе вторичных катушек:

$$E_1 = \omega I \omega_1 \omega_2 \left(\frac{G_0 G_1}{G_0 + G_1 + G_2} + G_{y.п} \right);$$

$$E_2 = \omega I \omega_1 \omega_2 \left(\frac{G_0 G_2}{G_0 + G_1 + G_2} + G_{y.п} \right).$$

д) Ток в первичной катушке:

$$I = \frac{\dot{U}_c}{r + j\omega \omega_1^2 G}.$$

3-6. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Дифференциальные индуктивные датчики — ДИД.
Задачей расчета является определение полных сопро-

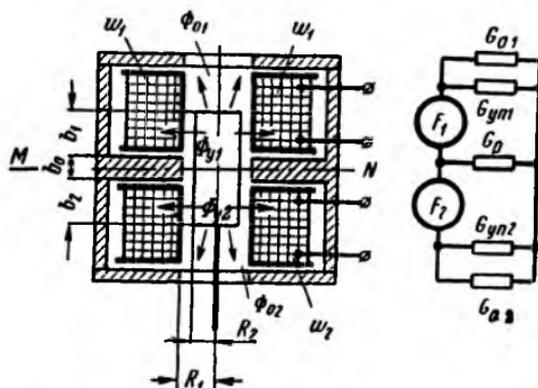


Рис. 3-7. Цилиндрический дифференциально-индуктивный датчик.

тивлений катушек датчика при разных положениях якоря.

Рассмотрим систему, изображенную на рис. 3-7.

а) Магнитные проводимости. Рассматриваются две составляющие магнитного потока, создавае-

мого каждой из катушек: Φ_0 — по цепи якорь — крышка — ярмо — диск — якорь и Φ_y — по периметру укоря к периметру ярма:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} + \Phi_{y1}; \quad \Phi_2 = \Phi_{02} + \Phi_{y2}.$$

По схеме замещения магнитные проводимости для потоков обеих катушек:

$$G_1 = \frac{G_0(G_{01} + G_{y.п1})}{G_0 + G_{01} + G_{y.п1}}; \quad G_2 = \frac{G_0(G_{02} + G_{y.п2})}{G_0 + G_{02} + G_{y.п2}},$$

где

$$G_0 = \mu_0 \pi \frac{(R_1 + R_2) b_0}{(R_1 - R_2)}; \quad G_{y.п1} = \frac{gb_1}{3}; \quad G_{y.п2} = \frac{gb_2}{3}.$$

Индуктивности катушек

$$L_1 = \omega_1^2 G_1; \quad L_2 = \omega_2^2 G_2$$

ДИД обычно выполняются так, что

$$\omega_1 = \omega_2.$$

Дифференциальные трансформаторные датчики ДТД. ДТД выполняются двояко: с сосредоточенной или распределенной по длине магнитной системы первичной обмоткой (рис. 1-9). Системы с сосредоточенной первичной обмоткой применяются, как правило, при малых ходах якоря (до 1 мм); магнитопровод в этих системах развит по диаметру.

Системы с распределенной первичной обмоткой применяются для ДТД с линейным перемещением до 5—7 мм, магнитопровод в этих системах развит по длине.

Расчет цилиндрических ДТД связан с решением нелинейных задач, что определяется сложной картиной распределения магнитного потока в системе, нелинейной зависимостью числа потокосцеплений вторичных катушек от положения якоря. Отдельные вопросы, связанные с решением аналогичных задач, изложены в [Л. 6 и 7].

3-7. НАПРЯЖЕНИЕ НЕБАЛАНСА ДАТЧИКОВ

При нейтральном положении якоря напряжение на выходе ДИД (выходное напряжение мостовой схемы) или ДТД должно быть равно нулю. В действительности

это условие весьма трудно осуществимо, и всегда имеет место некоторая величина выходного напряжения — напряжение небаланса $U_{\text{нб}}$. Возникновение напряжения небаланса объясняется неполной симметрией обеих половин датчиков, а также неравенством чисел витков. Наличие потерь в стали магнитопровода сказывается на увеличении значения $U_{\text{нб}}$. Эти потери приводят к ис-

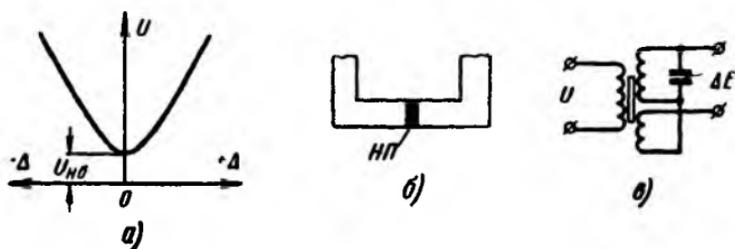


Рис. 3-8. Характеристика датчика и методы снижения э. д. с. небаланса.

кажению формы кривой тока в первичных катушках, на выходе вторичных катушек возникают э. д. с., содержащие, помимо основной, также гармоники высших порядков — четных и нечетных. При встречном включении катушек нечетные гармоники вычитаются, а четные складываются.

Составляющая выходного напряжения небаланса, определяемая четными гармониками, не сказывается в тех случаях, когда измерительное устройство выполняется по компенсационной схеме с применением двухфазных конденсаторных двигателей, так как вращающий момент двигателя определяется только основной гармоникой.

Следует учитывать, что электронные усилители, на которые включается выходное напряжение датчика, при этом перегружаются составляющими высших гармоник.

На рис. 3-8,а приведена кривая выходного напряжения ДТД. Значение $U_{\text{нб}}$ достигает величины 20—40 мв.

При изготовлении датчиков принимают ряд мер с целью уменьшения напряжения небаланса. Устанавливается допуск на величину омического сопротивления катушек ($\pm 2 \div 4\%$), проверяется выходное напряжение датчика без якоря, и при наличии э. д. с. холостого хода

(при встречно включенных катушках) снимают часть витков с одной из катушек.

По опытным данным, полученным при проверке цилиндрических ДТД с распределенной первичной обмоткой, напряжение небаланса снижается таким путем до 5 мв при удаленном якоре, а при установке якоря это напряжение возрастает до 10—15 мв.

Магнитопроводы плоских датчиков должны иметь жесткую конструкцию. Для этого набор листов магнитопровода покрывается с наружных сторон платами из немагнитной стали и весь пакет склепывается под прессом. Особое внимание уделяется выбору материалов для магнитопровода: рекомендуется применять стали с малыми удельными потерями, например Э4, Э310, пермаллой.

Для симметрирования двух комполюющихся магнитопроводов последние выполняются так, чтобы имелась возможность изменения величины нерабочих зазоров.

Так, в конструкции датчика (рис. 3-8,б) магнитопровод состоит из двух половин, между которыми вставляются изоляционные прокладки *ИП* разной толщины.

Напряжение небаланса определяется не только амплитудной, но и фазовой погрешностями. Компенсация сдвига по фазе осуществляется включением конденсаторов на выходе одной из катушек (рис. 3-8,в). В схемах с использованием выпрямленного выходного напряжения ДТД (рис. 2-12) фазовая погрешность не сказывается на работе устройства, а амплитудная компенсируется добавочными сопротивлениями.

3-8. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ДАТЧИКОВ

В компенсационных измерительных устройствах осуществляется совместная работа двух датчиков: измерительного и компенсационного. Измерительный ДТД может быть плоской или цилиндрической формы, компенсационный чаще всего бывает или в виде цилиндрического ДТД или ферродинамический (ФДД). Для обеспечения правильной их работы к указанным в § 3-7 требованиям добавляются дополнительные: равенство коэффициентов преобразования и совпадение выходных напряжений по фазе. В компенсационных измерительных устройствах компенсация перемещения чувствительного

элемента получается при изменении положения якоря компенсационного датчика, встраиваемого во вторичный прибор. Последний выполняется стандартным с целью применения его для измерения разных величин. Поскольку измерительный датчик проектируется из условий работы чувствительного элемента данного объекта,

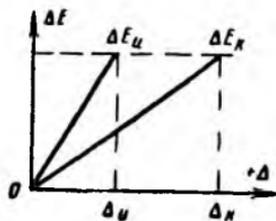


Рис. 3-9. Характеристики датчика.

его выходное напряжение может не совпадать по своей величине с напряжением стандартного компенсационного датчика. Для совместной работы обоих датчиков необходимо иметь возможность изменять коэффициент преобразования измерительного датчика.

Так, если предельное значение перемещения компенсационного датчика равно $\Delta_{к}$, а измерительного $\Delta_{и}$ (рис. 3-9), то коэффициент преобразования измерительного датчика должен быть равен

$$k_{д.и} = k_{д.к} \frac{\Delta_{к}}{\Delta_{и}}.$$

Регулирование коэффициента преобразования измерительного датчика осуществляется за счет изменения числа витков выходных катушек (последние выполняются с соответствующими отпайками).

Более точная подгонка параметров датчика с целью получения требуемого коэффициента преобразования осуществляется в конструкциях ДТД, выполненных так, что две вторичные катушки датчика могут смещаться одна относительно другой (см. авторское свидетельство № 157115 — К. И. Диденко, М. Д. Гафанович и В. А. Сушин).

3-9. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛА ПОВОРОТА—ФДД

При построении ФДД учитывают условия получения высокого значения коэффициента преобразования $k_{д}$ и возможности его регулирования, а также получения линейной характеристики при больших углах поворота α .

Расчет ФДД сводится в основном к построению ха-

рактеристики, вычислению тока в обмотке возбуждения и теплового режима катушки.

На рис. 3-10 показана конструктивная схема датчика Харьковского завода КИП. Основной магнитопровод состоит из двух полюсных башмаков Π_1 и Π_2 и сердечника, состоящего из двух частей: C_1 и C_2 . Деталь C_2 , выполненная в виде винта, может перемещаться относительно

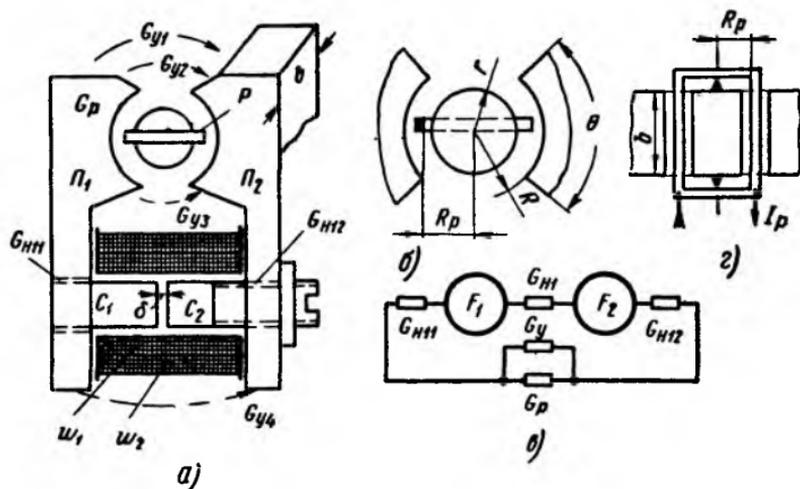


Рис. 3-10. Ферродинамический датчик угла поворота—ФДД.

детали C_1 ; при этом изменяется величина воздушного зазора δ . На сердечнике насажена катушка с двумя обмотками: возбуждения ω_1 и дополнительной ω_2 . Рамка P выполнена с большим числом витков ω_p .

Исходное уравнение

$$E_p = \frac{2}{\sqrt{2}} \omega B_p b \omega_p R_p \alpha,$$

где B_p — индукция в средней части рамки.

При определении B_p можно не учитывать магнитное сопротивление стали — величины относительно малой в магнитных системах с воздушными зазорами.

Схема замещения магнитной системы представлена на рис. 3-10, в.

В этой схеме G_{n1} , G_{n11} и G_{n12} — магнитные проводимости нерабочих зазоров у сердечника, G_p — рабочая

проводимость, G_y — магнитная проводимость потока рассеяния, являющаяся суммой магнитных проводимостей поля рассеяния на отдельных участках:

$$G_y = G_{y1} + G_{y2} + G_{y3} + G_{y4}.$$

Общая проводимость системы

$$G = \frac{G_n (G_p + G_y)'}{G_n + G_p + G_y},$$

где

$$G_n = \frac{G_{n1} G_{n11} G_{n12}}{G_{n1} G_{n11} + G_{n1} G_{n12} + G_{n11} G_{n12}}.$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{G_p + G_y}{G_p}.$$

Индуктивное сопротивление катушки возбуждения

$$x = \omega \omega_1^2 G.$$

Ток в катушке возбуждения

$$i = \frac{\dot{U}}{r + jx} = \frac{\dot{U}}{Z}.$$

Магнитный поток в системе

$$\Phi = \sqrt{2} I \omega_1 G = \sqrt{2} \frac{U}{Z} \omega_1 G.$$

Индукция в рабочем зазоре

$$B_p = \frac{\Phi}{R_p \theta b \sigma} = \sqrt{2} \frac{U \omega_1 G}{Z R_p \theta b \sigma},$$

где R_p — средний радиус рамки;
 θ — угол охвата полюсов.

в) Электродвижущая сила в рамке при повороте ее на угол α , рад:

$$E_p = \frac{2U \omega \omega_1 \omega_p G}{\theta z \sigma} \alpha.$$

При данных геометрических размерах системы и определенных значениях приложенного напряжения U и угловой частоты ω :

$$E_p = k_d \alpha,$$

где k_d — коэффициент преобразования датчика.

В конструкции ФДД завода КИП предельные значения углов поворота рамки α приняты, исходя из условий получения линейной выходной характеристики, равными $+20^\circ$ и -20° .

Характеристики ФДД. В описываемой конструкции предусматривается возможность регулирования значения k_d . Это осуществляется изменением зазора δ , благодаря чему изменяются величины магнитной проводимости системы, коэффициента рассеяния и полного сопротивления катушки.

На рис. 3-11 приведена зависимость $E_p = f(\alpha)$ при разных значениях зазора δ : прямая a при $\delta = 0,75$ мм, b — при $\delta = 0,1$ мм.

В ряде случаев нулевое значение E_p необходимо иметь на выходе не тогда, когда рамка устанавливается в нейтральной, а в одном из крайних положений. Это достигается

включением дополнительной обмотки ω_2 , насаженной концентрично с первичной ω_1 , последовательно с рамкой. При начальном положении рамки $\alpha = -20^\circ$, значение $E_p = 0$ получается при условии

$$E_2 = 4,44 f(\Phi_p + \Phi_y) \omega_2 = -E_{20},$$

где E_2 — напряжение на зажимах обмотки ω_2 ;

E_{20} — э. д. с. рамки при $\alpha = 20^\circ$.

Таким путем в случаях одностороннего отсчета выходного напряжения E_p увеличивается вдвое диапазон углового перемещения рамки (см. рис. 3-11, линия c).

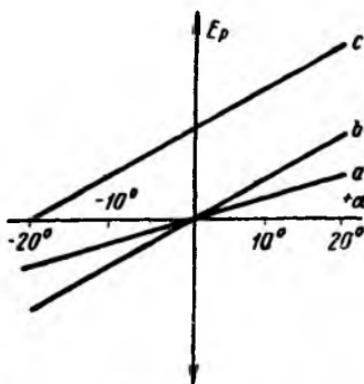


Рис. 3-11. Характеристики ФДД.

Увеличение коэффициента преобразования получается при выполнении конструкции (рис. 3-12), в которой рамка утапливается в поворотном сердечнике. В такой конструкции возможно свести до минимума зазоры меж-

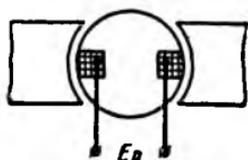


Рис. 3-12. Схема ФДД с обмоткой утопленной в поворотный сердечник.

ду сердечником и башмаками. Недостаток такой системы — большая величина момента инерции рамки с сердечником.

Пример. Определить характеристики ферродинамической системы с размерами в миллиметрах (обозначения см. на рис. 3-10):

$$R = 12,5; \quad r = 8,75; \quad b = 20; \quad R_p = 10,6; \quad \theta = 97^\circ = 1,69 \text{ рад.}$$

$$\omega_1 = 3500; \quad \text{при } \vartheta = 100^\circ \text{ С сопротивление } r = 170 \text{ ом};$$

$$\omega_p = 1200; \quad U_0 = 60 \text{ в}; \quad f = 50 \text{ гц.}$$

Примем величину зазора $\delta = 0,5 \text{ мм.}$

Проводимости, вычисленные по данным рабочих чертежей (см. схему замещения рис. 3-10, в):

$$G_{н1} = 280 \cdot 10^{-8} \text{ гн}; \quad \sigma = \frac{6 \cdot 10^{-8} + 21 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10^{-8}} = 4,5;$$

$$G_{н11} = G_{н12} = 942 \cdot 10^{-8} \text{ гн};$$

$$G_p = 6 \cdot 10^{-8} \text{ гн}; \quad G = 23,9 \cdot 10^{-8} \text{ гн};$$

$$G_{\Sigma} \text{ (суммарное)} = 21 \cdot 10^{-8} \text{ гн}; \quad x = 920 \text{ ом};$$

$$z = 937 \text{ ом}; \quad I = \frac{60}{937} = 0,064 \text{ а.}$$

По опытным данным, $I = 0,065 \text{ а};$

$$I\omega_1 = 0,064 \cdot 3500 = 224 \text{ а.}$$

Поток

$$\Phi = \sqrt{2} \cdot 224 \cdot 23,9 \cdot 10^{-8} = 75,5 \cdot 10^{-6} \text{ вб.}$$

Поток в зазоре рамки

$$\Phi_p = \frac{\Phi}{\sigma} = \frac{75,5 \cdot 10^{-6}}{4,5} = 16,8 \cdot 10^{-6} \text{ вб.}$$

Средняя площадь сечения рабочего зазора

$$S_p = R_p b \theta = 1,06 \cdot 2 \cdot 1,69 = 3,6 \text{ см}^2;$$

$$B_p = \frac{16,8 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 10^{-4}} = 4,67 \cdot 10^{-2} \text{ тл.}$$

Активная длина рамки

$$l = 2b\omega_p = 2 \cdot 2 \cdot 1200 = 4800 \text{ см.}$$

Электродвижущая сила рамки

$$E = 314 \frac{4,67 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{2}} 4800 \cdot 10^{-2} \cdot 1,06 \cdot 10^{-2} \alpha = 5,25\alpha, \text{ в.}$$

Таким образом, $k_d = 5,25 \text{ в/рад.}$

При повороте рамки на угол $\alpha = 10^\circ$

$$E_p = 5,25 \frac{10}{57,4} = 0,96 \text{ в.}$$

По опытным данным, в зависимости от величины зазора δ э. д. с. E_p при $\alpha = 10^\circ = 0,174 \text{ рад}$ получается в пределах от 0,75 до 1 в.

Число витков дополнительной катушки при $\alpha = 20^\circ = 0,35 \text{ рад}$:

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot 1200 \cdot 0,35}{4,5 \cdot 1,69} = 110.$$

Нагрев катушки: потери в омическом сопротивлении катушки

$$P_K = I^2 r = 0,064^2 \cdot 170 = 0,698 \text{ вт.}$$

Потери в стали: $P_c = 0,06 \text{ вт.}$

При принятых размерах катушки нагрев ее находится в пределах нормы.

3-10. РАСЧЕТ МАГНИТНО-ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ — МИД

В практике нашли применение два основных вида магнитно-индукционных датчиков:

1) с изменяющимся во времени потоком постоянного магнита;

2) со взаимным перемещением катушки и постоянного магнита.

Мид с изменяющимся потоком постоянного магнита.

В таких устройствах переменным является воздушный зазор в магнитной цепи постоянного магнита. Ход расчета устройства иллюстрируется на примере выполнения датчика скорости линейного или вращательного движе-

ния. Рассмотрим устройство для контроля вращательного движения, состоящее из датчика (рис. 3-13) и электромагнитного реле, включенного на его обмотку.

Основные условия работы устройства:

а) при угловой скорости $\Omega > \Omega_{н}$ контролируемого устройства должна быть замкнута одна пара контактов выходного реле;

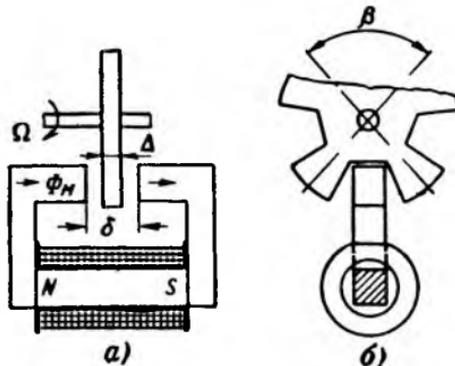


Рис. 3-13. Схема магнитно-индукционного датчика скорости.

б) при скорости $\Omega_{мин} < \Omega_{н}$, а также при остановке механизма первая пара контактов размыкается и замыкается другая.

Магнитопровод состоит из постоянного магнита и замыкающих систему двух полюсов из магнитомягкого материала.

На валу, движение которого контролируется, насаживается стальной зубчатый диск. Зубцы диска должны быть выполнены так, чтобы они перекрывали торцовую площадь полюсов.

а) Расстояние между полюсами δ , толщина диска Δ ; при вхождении диска воздушный зазор уменьшается от δ до $\delta - \Delta$.

б) Магнитные проводимости магнитопровода системы для потока магнита Φ_M .

При отсутствии зубца $G_1 = G_{11} + G_y$;

при наличии зубца $G_2 = G_{12} + G_y$,

где $G_{11} = S/\delta$; $G_{12} = S/(\delta - \Delta)$;

S — площадь полюса;

G_y — проводимость рассеяния.

в) Изменение потока постоянного магнита (рис. 3-3). При отсутствии зубца индукция в средней части магнита B_1 определяется пересечением кривой размагничивания постоянного магнита с прямой 1, проведенной под углом $\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{L_m}{S_m} G_1$; при наличии зубца диска в зазоре индукция в средней части магнита B_2 определяется пересечением кривой возврата с прямой 2, проведенной под углом α_2 :

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{L_m}{S_m} G_2.$$

Из рисунка видно, что при перемещении зуба в зоне полюсов индукция постоянного магнита изменяется на величину ΔB .

2) Мгновенное значение э. д. с., наведенной в катушке:

$$e = \omega S_m \frac{dB}{dt}.$$

Закон изменения индукции B при вхождении зубца диска в зону полюсов, а также при выходе его из этой зоны нелинейный, но для упрощения решения задачи принимают его линейным, т. е. считают, что изменение индукции на величину ΔB происходит равномерно в течение времени Δt . В течение одной половины периода, когда поток увеличивается при вхождении зуба в зону полюсов, наводится отрицательное значение э. д. с., во второй половине при выходе зубцов из зоны — положительное.

При шаге зубцов β рад и угловой скорости диска Ω имеем:

$$T = 2\Delta t; \quad \Delta t = 0,5 \frac{\beta}{\Omega}.$$

Выходное напряжение датчика подается на исполнительный механизм, например реле, через выпрямительный мост.

Среднее значение э. д. с. на выходе датчика:

$$E_c = \omega S_m \frac{\Delta B}{\Delta t} = 2\omega S_m \frac{\Delta B \Omega}{\beta}.$$

д) Токи в цепи управления. На выходе датчика обычно включается высокочувствительное реле, например поляризованное.

Учитываем два значения тока в катушке реле:

$I_{ср}$ — ток срабатывания, получающийся при угловой скорости Ω_1 , близкой к номинальному для данного устройства;

$I_{отп}$ — ток отпускания, соответствующий минимально допустимой угловой скорости привода $\Omega_{мин}$,

$$I_{ср} = \frac{E_1}{r_d + r_p} = \frac{2\omega S_m \Delta B}{(r_d + r_p) \beta} \Omega_1;$$

$$I_{отп} = \frac{2\omega S_m \Delta B}{(r_d + r_p) \beta} \Omega_{мин},$$

где r_d, r_p — омические сопротивления катушек датчика и реле.

Для получения максимальной эффективности работы стремятся выдержать условие $r_p = r_d$.

Каждое исполнение реле характеризуется определенным значением коэффициента возврата:

$$k_B = \frac{I_{отп}}{I_{ср}} = \frac{\Omega_{мин}}{\Omega_1}.$$

В электромагнитных реле величина k_B бывает порядка 0,15—0,25.

МИД со взаимным перемещением катушки и постоянного магнита. В качестве примера рассмотрим расчет вибродатчика сейсмического типа, описание которого приведено в § 1-6.

На рис. 3-14 приведен расчетный эскиз устройства. Вибродатчик предназначен для измерения амплитуды колебаний частей машин. Для измерения амплитуд вертикального направления датчик располагается вертикально. Сейсмическая масса, состоящая из постоянного магнита с полюсными башмаками и укрепленная на пружинах, должна иметь частоту собственных колебаний, в 2,5—3 раза меньшую частоты колебаний вибрирующей части машины. В этом случае при вибрациях части машины перемещается корпус датчика с катушкой, а магнит остается неподвижным.

а) Частота собственных колебаний магнита.

Эта частота определяется из соотношения

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где c — жесткость пружины, кгс/м;

m — масса всех частей, связанных с магнитом, кгс · сек²/м.

В конструкции выполненного вибродатчика для контроля работы паровых турбин жесткость плоских пружин $c_{\text{п}}=14,8 \text{ кгс/м}$; жесткость спиральной пружины $c_{\text{сп}}=8,34 \text{ кгс/м}$; масса магнита с деталями $m=9,79 \cdot 10^{-3} \text{ кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$; приведенные массы плоских и спиральных пружин

$$\frac{1}{3} m_{\text{сп}} + 0,4 m_{\text{п}} = 0,205 \cdot 10^{-4} \text{ кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{м}.$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{14,8 + 8,34}{9,79 \cdot 10^{-3} + 0,205 \cdot 10^{-4}}} = 7,6 \text{ гц}.$$

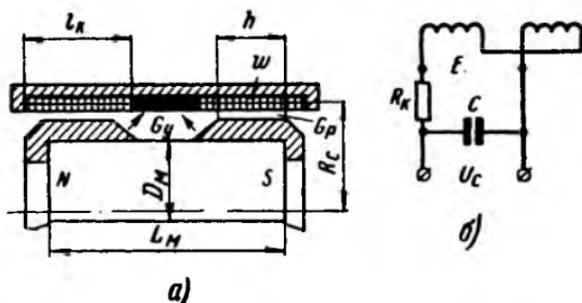


Рис. 3-14. Эскиз магнитной системы и схема вибродатчика сейсмического типа.

Таким образом, датчик может быть применен для установок с минимальной частотой вибраций порядка 25 гц. Для измерения вибраций меньшей частоты необходимо увеличить массу магнита.

б) Индукция магнитного поля в рабочем зазоре. Магнит намагничивается отдельно. Вначале определим значение потока Φ_m в средней его части с сечением S_m . Магнитная индукция отдельного магнита в средней его части (нейтрали) — B_1 (см. рис. 3-3, в), при установке магнита в магнитопроводе значение индукции B_2 ; прямая OB_2 проводится под углом α_2 , причем

$$\alpha_2 = \text{arctg} \frac{L_M}{S_m} \sigma G_p.$$

где G_p — проводимость рабочего воздушного зазора.

В рассматриваемой конструкции G_p относится только к цилиндрической поверхности башмака; поток, протекающий от конических поверхностей к яруму и определяемый по проводимости G_y , относят к полям рассеяния, так как индукция этого поля невелика. Вычисленные значения G_p и G_y для одного зазора надо делить на 2, так как линия поля магнита 2 раза проходит по зазору.

Поток магнита пересекает катушку. Площадь сечения потока в средней части катушки равна

$$2\pi R_c h,$$

Индукция поля магнита в этой средней части

$$B = \frac{B_2 S_M}{\sigma 2\pi R_c h}.$$

В рассматриваемом примере

$$B = 0,11 \text{ тл.}$$

в) Длина проводников, пересекаемых полем. Вся катушка состоит из двух обмоток с числом витков ω каждая. Обе обмотки включаются встречно. Общее значение наведенной э. д. с. равно сумме э. д. с. каждой, так как эти обмотки пересекаются полем разного знака.

Активная длина обмотки

$$l_a = 2 \frac{\omega h}{l_K} 2\pi R_c.$$

где ω/l_K — число витков на единицу длины катушки.

В данной конструкции $\omega = 2500$; $l_K = 14,1 \text{ мм}$.

г) Относительная скорость колебательного смещения катушки. Амплитудное значение этой скорости v_M ; при максимальном значении смещения X_M определяется из соотношения

$$v_M = 2\pi f X_M.$$

Если принять $X_M = 1 \text{ мк} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, частоту вибраций $f = 50 \text{ гц}$, то $v_M = 2\pi \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м/сек}$.

Электродвижущая сила на выходе датчика

$$E_M = B l_a v_M = 0,11 \cdot 14,1 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ в.}$$

E_M — максимальное значение э. д. с. на выходе, определяемое скоростью колебательного смещения катушки и поля магнита. Для определения величины смещения X_M надо интегрировать полученное значение.

д) Интегрирующий контур выполняется обычно в виде контура RC (рис. 3-14,б). На вход контура подается напряжение выхода преобразователя.

Уравнение контура

$$E(t) = U_R + U_C = iR + \frac{1}{C} \int i dt.$$

Для интегрирующего контура сопротивление R выбирается во много раз большим сопротивления $1/\omega C$. Тогда падение напряжения $U_R \gg U_C$ и значением U_C можно пренебречь.

В этом случае

$$i = \frac{E(t)}{R}; U_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int E(t) dt.$$

Таким образом, значение U_C пропорционально интегралу по времени входного сигнала, но ослабленному в RC раз, а в случае, когда входной сигнал является гармоническим колебанием,

$$e = E_m \sin \omega t;$$

это ослабление получается в ωRC раз.

При емкости $C=2$ мкф

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 2} = 1\,590 \text{ ом.}$$

Общее омическое сопротивление обмотки обеих катушек $R_0=5\,200$ ом.

Задаваясь отношением $\frac{R}{1/\omega C} = 7$, получаем:

$$R = 7 \cdot 1\,590 = 11\,130 \text{ ом.}$$

Сопротивление контура

$$R_k = 11\,130 - 5\,200 = 5\,930 \text{ ом;}$$

Принимаем

$$R_k = 6\,000 \text{ ом;}$$

Общее сопротивление

$$R = 6\,000 + 5\,200 = 11\,200 \text{ ом.}$$

Включение интегрирующего контура вызывает ослабление сигнала вибродатчика в 7,05 раз.

д) Окончательные данные. При $f=50$ гц и амплитуде смещения 1 мк напряжение на выходе преобразователя

$$E_m = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ в.}$$

Напряжение на выходе интегрирующего контура

$$E_n = \frac{4,87 \cdot 10^{-3}}{7,05} = 0,691 \text{ мв.}$$

3-11. РАСЧЕТ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОК — ПЕРЕМЕЩЕНИЕ (МЭС)

Магнитоэлектрические системы МЭС применяются в качестве элементов преобразователей, выполненных по схеме с компенсацией, или же в качестве исполнительных элементов.

Основные параметры. Характерными параметрами МЭС являются: потребляемая мощность, ход рамки x , величина силы на рамке Q_p , коэффициент преобразования k_c .

Потребляемая мощность выполненных конструкций МЭС колеблется в пределах 10—1 500 мвт, причем в одном конструктивном исполнении возможно осуществить системы с потребляемой мощностью в пределах от 1 : 25. Поэтому для диапазона 10—1 500 мвт требуется всего

3 исполнения: 10—250, 25—600, 600—1500 мвт, отличающиеся по габаритным размерам.

Ход рамки определяется назначением устройства: в электропневматических преобразователях с дросселированием воздуха методом «сопло — заслонка» значе-

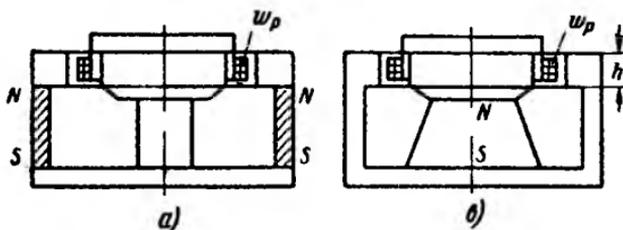


Рис. 3-15. Конструктивные формы магнитных систем МЭС.

a — с полым цилиндрическим магнитом; *б* — со сплошным магнитом.

ние X достигает $\pm 0,4$ мм, в электрогидравлических системах для струйных трубок ± 2 мм, для золотников ± 4 мм.

В выполненных МЭС значение силы Q_p находится в пределах от 0,05 до 0,5 кгс. Рамка МЭС соединяется обычно с пружинами: плоскими при малом ходе, винтовыми цилиндрическими — при значительных перемещениях.

Жесткость пружин определяется по предельной силе и предельному ходу:

$$c = \frac{Q_{p \text{ макс}}}{X_{\text{макс}}}$$

Конструктивные формы. В практике нашли применение две основных конструктивных формы МЭС: с постоянным магнитом в виде полого цилиндра и с круглым сплошным магнитом (рис. 3-15). Наибольшее распространение в устройствах автоматики получила вторая форма конструкции. В этой конструкции над магнитом устанавливается круглый башмак из магнитомягкого материала. Диаметр башмака выбирают бóльшим диаметром магнита.

Крепление постоянных магнитов может быть осуществлено склеиванием их с деталями магнитопровода — основанием и полюсным башмаками.

Основные соотношения — сила на рамке

$$Q_D = k \sqrt{L_M S_M P},$$

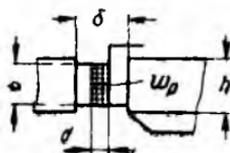
где k — коэффициент, определяемый конструкцией МЭС;

L_M, S_M — длина и площадь поперечного сечения постоянного магнита;

P — потребляемая мощность рамки.

Размеры постоянного магнита. Для уменьшения размеров устройства применяют магниты из высококоэрцитивных сплавов, например Альнико V. Стремятся

Рис. 3-16. Эскиз рамки МЭС,



к максимальному использованию свободной магнитной энергии в зазоре магнита и в расчетах учитывают оптимальные его величины B_D и H_D (см. рис. 3-4).

Площадь сечения магнита

$$S_M = \frac{B_D \sigma S_p}{B_D} \text{ [м}^2\text{]},$$

где $S_p = l_p h$ — средняя площадь сечения рабочего зазора, м²;

l_p — средняя длина кольцевого зазора.

Длина магнита

$$L_M = \frac{c_1 B_p \delta}{H_D^{1.5}},$$

где c_1 — коэффициент, учитывающий падение магнитного потенциала в нерабочих зазорах системы;

δ — длина зазора между полюсным башмаком и ярмом (рис. 3-16).

Обмоточные данные рамки. Конструктивно задаются размерами b и d рамки (см. рис. 3-16). Для определения числа витков принимаются дополнительные соотношения

$$w_p = mbd; \quad r = r_0 l_p w_p,$$

где m — число витков на 1 м² площади намотки;

r_0 — сопротивление 1 м медной проволоки.

Из полученных соотношений имеем:

$$\frac{\omega_p^2}{r} = \frac{mbd}{r_0 l_p} = c_H \frac{bd}{l_p},$$

где $c_H = m/r_0$ — величина постоянная для проволок, незначительно отличающихся по диаметру.

Для проволок диаметром 0,1, 0,06, 0,08 мм значение c_H равно в среднем $25 \cdot 10^6$.

Площадь сечения меди катушки

$$q_H = f_H \frac{bd}{\omega_p},$$

где f_H — коэффициент заполнения катушки, равный в среднем 0,5 для указанных размеров проволок.

Пример. Провести расчет МЭС со следующими параметрами: ток рамки $I = 5$ ма, сопротивление не выше 2000 ом.

$$P_{\text{макс}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 = 50 \text{ мвт.}$$

При расчете требуется принимать некоторые параметры на основании практических данных.

В наиболее рационально построенных моделях значение B_D получается в пределах 0,2—0,23 тл, σ — в пределах 1,5—2,5, c_1 — в пределах от 1,1 до 1,4, l_p — около 0,125 м.

Примем: материал магнита Альнико V.

$$B_D = 0,9 \text{ тл; } H_D = 4 \cdot 10^4 \text{ а/м;}$$

$$B_p = 0,2 \text{ тл; } \sigma = 2,0; \quad c_1 = 1,2; \quad l_p = 0,125 \text{ м;}$$

$$h = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м; } S_p = 0,125 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$\delta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м; } b = 0,01 \text{ м; } d = 0,003 \text{ м.}$$

$$S_m = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 6,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Диаметр магнита

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} = 29 \text{ мм.}$$

Принижаем средний диаметр магнита 30 мм, а у основания для пропуска потоков рассеяния — бóльшим.

$$L_m = \frac{1,2 \cdot 0,2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^4 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 16 \text{ мм};$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{rc_n b d}{l_p}} = \sqrt{\frac{2000 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{0,125}} = 3460.$$

Площадь сечения проволоки

$$q = f_n \frac{b d}{\omega_p} = 0,433 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2;$$

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4q}{\pi}} = 0,074 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_{\text{пр}} = 0,08 \text{ мм}$;

Уточненное число витков рамки равно $\omega_p = 3000$; $r = 1500 \text{ ом}$.

Сила на рамке $Q_p = 0,102 \cdot 0,2 \cdot 0,125 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 = 0,038,2 \text{ кгс} \approx 38 \text{ гс}$.

(Потребляемая мощность

$$P = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = 37,5 \text{ мвт}.$$

В данном выполнении системы за счет увеличения потребляемой мощности можно получить значительно бóльшие величины силы на рамке. С увеличением потребляемой мощности P сила увеличивается пропорционально корню квадратному из P .

В рассмотренном примере плотность тока в проволоке равна:

$$j = 1 \text{ а/мм}^2.$$

Увеличивая плотность тока в 2,5 раза, получают увеличение силы также в 2,5 раза.

3-12. РАСЧЕТ ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОК — ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Ферродинамические системы применяются в тех случаях, когда требуется, чтобы линейное перемещение рамки было пропорционально квадрату силы тока (см. § 2-12).

Конструктивно ФДС идентичны МЭС, с той разницей, что поток возбуждения создается не постоянным магнитом, как это имеет место в МЭС, а добавочной катушкой ω_b , включаемой последовательно с рамкой ω_p (см. рис. 3-17).

Для получения требуемой величины индукции B_p необходимо, чтобы м. д. с. катушки возбуждения была равна:

$$F_B = I_p \omega_B = c_1 \frac{B_p \delta}{\mu_0},$$

где c_1 — коэффициент, учитывающий падение магнитного потенциала в стали; значение c_1 колеблется в пределах 2,25—1,3.

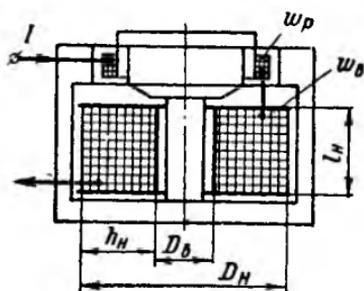


Рис. 3-17. Схема ферродинамической системы ФДС.

Площадь сечения сердечника принимается из условия, чтобы индукция в стали $B_{ст}$ была порядка 0,4—0,5 тл.

$$S_{ст} = \frac{B_p S_p \sigma}{B_{ст}}.$$

При проектировании ФДС обычно задаются силой тока в катушках. Тогда при заданных величинах B_p и δ можно найти значение ω_B .

Определение размеров катушки возбуждения производят с учетом условия получения минимальных размеров магнитной системы или же минимальной потребляемой мощности. В первом случае расчет проводится по тепловому режиму с тем, чтобы превышение температуры катушки θ было в пределах нормы. Уменьшение потребляемой мощности преобразователя достигается за счет увеличения длины сердечника магнитопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н., Датчики автоматического контроля и регулирования, Изд-во «Машиностроение», 1965.
2. Диденко К. И., Гусева Ж. А., Новая аппаратура контроля и регулирования, Машгиз, 1961.
3. Иорис Ю. И., Измерение вибраций, Машгиз, 1956.
4. Куликовский Л. Ф., Индуктивные измерители перемещений, Госэнергоиздат, 1961.
5. Полонников Д. Е., Электронные усилители автоматических компенсаторов, Физматгиз, 1960.
6. Сотсков Б. С., Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры, Госэнергоиздат, 1950.
7. Ступель Ф. А., Электромеханические реле, изд. Харьковского государственного университета, 1956.
8. Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1959.
9. Шенброт И. М., Централизованный контроль технологических процессов, Госэнергоиздат, 1961.
10. Княжидский П. И., Рашкович М. П., Индуктивные проходные преобразователи в станках с программным управлением, Машгиз, 1962.
11. Серенсен С. В., Тетельбаум Н. М., Лейкин А. С., Максименко И. В., Статические индуктивные тензометры и их применение, Оборонгиз, 1949.
12. Мильштейн В. Н., Основы электрического расчета индуктивных измерителей малых перемещений, «Автоматика и телемеханика», 1940, № 2.
13. Рудашевский Г. Е., Измерение крутильных колебаний во вращающихся валах, Известия АН СССР, ОТН, 1946, № 1.
14. Бояров А. И., Электрическая измерительная схема автомата для контроля и сортировки конических роликов. Сборник «Автоматизация технологических процессов в машиностроении», Изд-во АН СССР, 1935.
15. Рожков А. В., Индуктивные методы механизации и автоматизации контроля в машиностроении. В указанном выше сборнике.
16. Чамак В. С., Индуктивный пишущий измеритель малых перемещений, «Измерительная техника», 1956, № 2.
17. Садовский А. С., Индуктивный датчик повышенной чувствительности для регистрации линейных и угловых перемещений, «Автоматика и телемеханика», 1957, № 9

18. Гальперин Л. Б., Богад И. С., Бесконтактный индуктивный выключатель, Углетехиздат, 1957.
 19. Розанов Н. В., Чанаев М. Г., Бесконтактное реле перемещений на кристаллических триодах, «Приборостроение», 1957, № 2.
 20. Рудный Н. М., Коломиец А. Р., Липовецкая Г. И., Компенсационный прибор для дистанционного измерения плотности жидкости, «Автоматика и приборостроение», 1961, вып. 1.
 21. Электромеханические системы для линейных перемещений. Экспресс-информ. АУ-5, 1958, январь.
 22. Ивенский Ю. Н., Лейман А. А., Готовский А. С., Бесконтактные путевые выключатели для схем управления, «Станки и инструмент», 1962, № 4.
 23. Кенигсберг В. Л., Юровский А. Я., К вопросу создания унифицированной системы датчиков, «Приборостроение», 1962, № 2.
 24. Миронов В. Д., О параметрах унифицированного сигнала связи. «Приборостроение», 1962, № 6.
 25. Декабрун И. Е., Электромагнитные поляризованные реле и преобразователи. Госэнергониздат, 1959.
 26. Пульвер Ю. М., Бесконтактный электромагнитный исполнительный и логометрический механизм, «Приборостроение», 1957, № 1.
 27. Юркевич А. П., Вовченко Н. Я., Расчет электрических измерительных устройств и систем с силовой компенсацией, Оборонгиз, 1961.
 28. Ступель Ф. А. и Раисов Ю. А., Устройства обратной связи для импульсных следящих систем, «Автоматика и приборостроение», 1963, № 2.
 29. Коченов М. И., Чаман В. С., Индуктивные измерители со счетно-решающим устройством, «Измерительная техника», 1961, № 1.
 30. Измерение радиальных зазоров и деформаций паровых турбин БТИ — ОРГРЭС, 1961, «Энергетика за рубежом».
 31. Аракестьянц Н. М., Мощные линейные индуктивные преобразователи для датчиков усиления, «Приборостроение», 1962, № 8.
 32. Feistel E., Messung und Registrierung des Walzdruckes mit Induktion Längenmessgerät, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1952, № 21.
 33. Basel C., Messanlage zur Überwachung vor Dampfturbinen, Archiv für Technisches Messen, 1956, Okt.
 34. Hornfleck, Wermelskirchen, The movable core transformer as a pickup for industrial telemetering system, Transactions AIEE, 1955, part I.
 35. Frölich C., Moderne Regler und Überwachungsanlagen für Industrie und Energieversorgungsbetriebe, Elektro-technische Anzeiger, 1957, Jan.
 36. Response of combination valve actuators, Instr. and Autom., 1958, № 9.
 37. Holzbrock W., Simplified equations speed moving coil design, Control Eng., 1961, № 5.
-

Цена 28 коп.

