

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

к расчетно-графической работе по дисциплинам
«Физические основы получения информации»,
«Сенсорные элементы медицинских приборов»
для студентов очной формы обучения
направления подготовки
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 681.2
М54

Р е ц е н з е н т:

А.Ю. Тараховский – к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения»

Составители: А.П. Васютенко, Н.А. Балакина

М54 Методические рекомендации к расчетно-графической работе по дисциплинам «Физические основы получения информации», «Сенсорные элементы медицинских приборов» для студентов очной формы обучения направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» / Сост. А.П. Васютенко, Н.А. Балакина. – Севастополь: СевГУ, 2021. – 49 с. – Текст : электронный.

Методические рекомендации предназначены для учебно-методического обеспечения дисциплин «Физические основы получения информации», «Сенсорные элементы медицинских приборов».

Целью методических рекомендаций является оказание помощи студентам при выполнении расчетно-графических работ по указанным выше дисциплинам.

УДК 681.2

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», протокол № 7 от 29 января 2021 г.

Рекомендовано в качестве методических рекомендаций для студентов очной формы обучения направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии».

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1. Требования к оформлению расчетно-графической работы.....	5
1.2. Защита РГР.....	7
2. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	9
2.1. Цель работы	9
2.2. Теоретический раздел	9
2.3. Методика расчёта индуктивных преобразователей	14
2.3.1. Порядок расчета индуктивного преобразователя с П-образным и Ш-образным сердечником и плоским якорем.....	17
2.3.2. Порядок расчёта индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником и плоским якорем.....	30
3. РАСЧЁТ СИЛЬФОННЫХ ПНЕВМОЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	36
3.1. Цель работы	36
3.2. Описание принципиальной схемы преобразователя.....	36
3.3. Методика расчёта дифференциальных сильфонных пневмоэлектродных преобразователей	38
3.3.1. Определение диапазона измерения.....	38
3.3.2. Выбор параметров пневматической системы	39
3.3.3. Расчет параметров сильфонного преобразователя.....	39
3.5. Расчет статической характеристики.....	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	44
ПРИЛОЖЕНИЯ	45

ВВЕДЕНИЕ

Точность и надежность работы машин и механизмов в значительной степени определяется точностью изготовления размеров и форм деталей, качеством их сопряжения. Важная роль в решении этой задачи принадлежит средствам автоматического контроля и управления, которыми в настоящее время оснащается технологическое оборудование. Наряду с электрическими средствами автоматизации в настоящее время всё более широкое применение находят пневматические устройства, приборы и системы. Это связано с их высокой надежностью, простотой обслуживания, пожаровзрывобезопасностью, невысокой стоимостью.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Требования к оформлению расчетно-графической работы

Расчетно-графическая работа (РГР) оформляется на листах формата А4 (210×297), на одной стороне листа с соблюдением требований к текстовым документам, установленным ГОСТ 2.105 – 95 ЕСКД (с рамками и штампами). Общие требования к текстовым документам и ГОСТ 2.106 – 96 ЕСКД. Текстовые документы.

При выполнении РГР с применением ЭВМ используют следующие параметры: левое поле – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм, гарнитура шрифта – Times New Roman, размер символов – 14 pt, междустрочный интервал – 1,5 строки, величина отступа (красная строка) – 1 см, автоматический перенос слов, выравнивание по ширине страницы, обязательна сквозная нумерация страниц арабскими цифрами, проставляемыми в нижнем правом углу страницы. Титульный лист считается первой страницей, номер на нем не ставится. Нумерация страниц проставляется, начиная с 3 листа.

Пример оформления титульного листа приведен в [прил. А](#). Задание к РГР состоит из двух листов (двухсторонняя печать). В задании указываются содержание и последовательность выполнения работ. Бланк индивидуального задания приведен в [прил. Б](#).

Отчет о выполнении расчетно-графической работы должен быть написан стилистически и орфографически грамотно.

Общие требования к его составлению:

- четкость построения;
- логичность и последовательность изложения материала;
- краткость и четкость формулировок.

Отчет должен содержать:

- Титульный лист (см. [прил. А](#));
- Задание на курсовой проект ([прил. Б](#));
- Содержание (с штампом для текстовых документов);
- Введение;
- Основную часть;
- Заключение;
- Список использованных источников;
- Приложения (при наличии).

Название раздела нумеруется и пишется прописными буквами и располагается симметрично строке без переноса слов. Точка в конце названия раздела не ставится, название не подчеркивается. Название раздела отделяется от следующего текста. Каждый раздел начинается с новой страницы.

Подразделы должны иметь двойную нумерацию арабскими цифрами (например, 1.1). Название подраздела отделяется от следующего текста. Части подраздела могут иметь тройную нумерацию (например, 1.1.1). Дальнейшее де-

ление не допускается. Подразделы начинаются на той же странице, где заканчивается предыдущий подраздел (внутри раздела).

В РГР должна использоваться сквозная нумерация рисунков, таблиц, формул. Допускается нумерация в пределах раздела.

Все вычисления и расчетные формулы необходимо представлять в общем виде, применяя для исходных величин стандартные буквенные обозначения, вместо которых затем следует подставить их числовые значения. По каждой применяемой формуле, коэффициенту и другим данным необходимо указывать их название и источник. В прямых скобках указывать порядковый номер источника согласно списку использованных источников. Подстановку числовых значений надо проводить в том же порядке, в котором написаны в формуле обозначения, не делая промежуточных сокращений.

Расчетные формулы должны помещаться на отдельной строке с выравниванием по центру.

Формулы нумеруются арабскими цифрами, помещаемыми в круглых скобках справа от формулы. После формулы ставится запятая и с новой строки после слова «где» идет расшифровка каждого обозначения. Расшифровке подлежат только обозначения, встречающиеся впервые. Ссылки на формулы в тексте обязательны.

Расчеты должны сопровождаться краткими пояснениями производимых действий. Полученные после вычислений значения параметров следует округлять по стандарту и указывать размерность. Все размерности физических величин должны даваться в системе СИ. Запрещаются любые сокращения, кроме общепринятых.

При необходимости расчеты сопровождают поясняющими его эскизами, схемами и т.п.

При выполнении расчетов на ПЭВМ студент должен изложить методику расчета, привести основные расчетные формулы, блок-схему алгоритма, обосновать выбор исходных данных и привести анализ полученных результатов. Обязательным является обоснование принятых решений.

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами. Ссылки на иллюстрации в тексте обязательны. Все рисунки отделяются от основного текста и должны иметь подрисуночные надписи. Рисунки располагаются сразу после упоминания или на следующей странице. Допускается использование фотографий, ксерокопий и т.п.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами. Если таблица имеет продолжение, то на следующей странице пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы. Ссылки на таблицы в тексте обязательны. Название таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире, например, Таблица 1 – Номенклатура выпускаемой продукции.

Ссылки на использованные источники должны нумероваться арабскими цифрами по порядку появления в списке и помещаться в квадратные скобки.

Список использованных источников оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. В списке использованных источников указывается автор, название, издательство, год издания и объем в страницах.

Приложения (при наличии) располагают в конце. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы. Оно должно иметь заголовок. В тексте документа на все приложения должны быть даны ссылки.

РГР должно быть сброшюровано.

Для выполнения расчетно-графической работы каждому студенту выдается индивидуальное задание (прил. В). Номер варианта выбирается студентом по последней цифре номера зачетной книжки.

1.2. Защита РГР

Проверенное РГР защищается студентом.

Если РГР содержит принципиальные ошибки, оно должно быть исправлено и сдано для повторной проверки. Ошибки исправляются и записываются на обратной стороне предыдущего листа.

Защита РГР производится после ее подписи руководителем в соответствии с графиком защиты. Для защиты РГР необходимо подготовить доклад о проделанной работе с приведением основных результатов работы. Длительность доклада – не более 5 минут.

Руководитель, принимающий РГР, задает вопросы по работе.

Оценка за РГР учитывает:

- качество выполненной РГР;
- техническое содержание доклада;
- правильность и полноту ответов на вопросы.

Типовые вопросы.

По индуктивным преобразователям:

1. Перечислите достоинства индуктивных преобразователей.
2. Приведите схемы различных типов индуктивных преобразователей.
3. Как определить общее передаточное отношение индуктивного прибора?
4. Приведите статические характеристики индуктивных преобразователей с переменным зазором и площадью зазора.
5. Как рассчитать количество витков катушки преобразователя?
6. Из какого условия выбирается величина начального зазора δ_0 между якорем и неподвижным сердечником катушки преобразователя?
7. Как определить передаточное отношение преобразователя по его статической характеристике?

По сальфонным пневмоэлектроконтактным преобразователям:

1. Перечислите достоинства и недостатки пневматического метода измерения.

2. Какое влияние оказывает диаметр входного сопла на характер статической характеристики преобразователя?
3. Как определить предел измерения преобразователя?
4. Из какого материала выполнены сильфоны и контакты сильфонного преобразователя?
5. Как определить общее передаточное отношение прибора?
6. Как осуществляется подготовка и стабилизация рабочего давления воздуха?
7. Как производится настройка измерительного устройства?

2. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Цель работы

Целью выполнения расчётно-графического задания является углубленное изучение студентами принципов, методов и средств преобразования сигналов в индуктивных измерительных преобразователях; освоение методик выбора параметров индуктивных преобразователей для линейных измерений и расчёта преобразователей с П-образным и Ш-образным сердечником и плоским якорем, а также преобразователей с цилиндрическим сердечником и плоским якорем.

2.2. Теоретический раздел

Индуктивные приборы для линейных измерений в машиностроении

Индуктивные приборы отличаются высокой точностью, позволяют вести дистанционные измерения, сравнительно небольшие габариты индуктивных преобразователей позволяют создавать компактные измерительные устройства. Наличие единого источника энергии (электрического тока) является существенным преимуществом перед пневматическими приборами, где требуется питание электрическим током и сжатым воздухом.

В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых её параметров, определяющих величину индуктивности – L .

Для получения возможно большей индуктивности катушка, как правило, выполняется с магнитопроводом из ферромагнитного материала. Как известно из электротехники сопротивление такой катушки (без учета потерь на гистерезис в вихревые токи) равно:

$$Z = R + j\omega L ,$$

где R – сопротивление катушки постоянному току, Ом;

$$j\omega L = j\omega \frac{W^2}{R_M} - \text{индуктивное сопротивление, Ом;}$$

$\omega = 2\pi f_0$ – круговая частота питающего напряжения (f_0 – частота в герцах);

W – количество витков катушки;

R_M – магнитное сопротивление магнитной цепи катушки, 1/Гн.

Обычно один из элементов магнитной цепи (рис. 2.1, а) выполняется подвижным (якорь) и его положение относительно неподвижной части будет определять величину магнитного сопротивления цепи R_M , а, следовательно, и индуктивного сопротивления катушки.

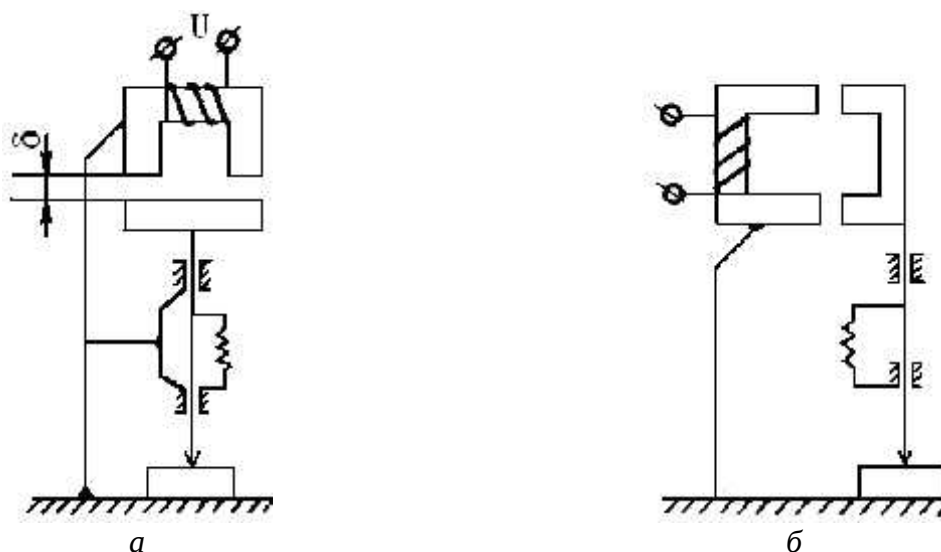


Рисунок 2.1 – Схемы индуктивных преобразователей дроссельного типа

Если связать перемещение якоря с измеряемой линейной величиной δ , при постоянных параметрах напряжения питания, возникает функциональная зависимость между δ и электрическим сопротивлением Z :

$$Z = \varphi(\delta),$$

где δ – измеряемая линейная величина.

Устройство, которое преобразует линейные перемещения в изменения электрического параметра Z с помощью вышеописанной катушки называется индуктивным преобразователем. Индуктивный прибор может быть представлен следующей принципиальной схемой (рис. 2.2).

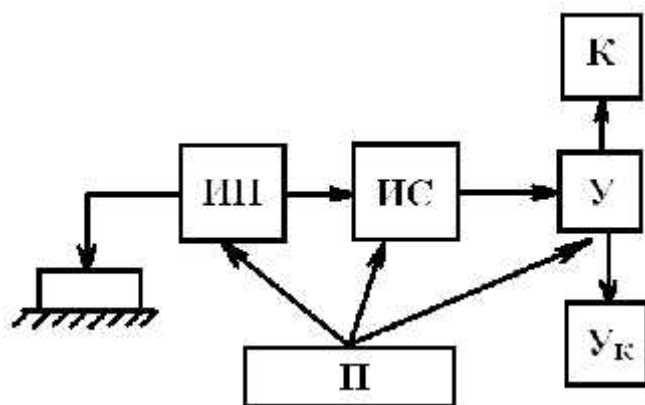


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема индуктивного прибора

На рисунке приняты следующие обозначения: *ИП* – индуктивный преобразователь, *ИС* – измерительная схема, служащая для преобразования измерительного сигнала в другой удобный для получения результата измерения, обеспечения удобства хранения, передачи, отображения и т.д. электрический параметр (напряжение, сила тока), *У* – электронный усилитель (если в этом есть не-

обходимость), U_k – указательное устройство, K – устройство для подачи команд, Π – источник питания.

Общее передаточное отношение индуктивного прибора K_S будет равно:

$$K_S = K_{\Pi\Pi} \cdot K_{\text{ИС}} \cdot K_Y \cdot K_{Y_k}, \quad (2.1)$$

где $K_{\Pi\Pi} = \frac{dZ}{dd}$ – передаточное отношение преобразователя;

$K_{\text{ИС}} \frac{dU_{\text{вс}}}{dZ}$ или $K_{\text{ИС}} \frac{dI_{\text{вс}}}{dZ}$ – передаточное отношение измерительной схемы;

$U_{\text{вс}}$ и $I_{\text{вс}}$ – напряжение и ток на выходе схемы;

$K_Y = \frac{dU}{dU_{\text{вс}}}$ – передаточное отношение (коэффициент усиления) усилителя;

U – выходное напряжение усилителя;

$K_{Y_k} = \frac{da}{dU}$ – передаточное отношение указывающего устройства;

a – перемещение указателя.

Таким образом,

$$K_S = \frac{dZ}{dd} \cdot \frac{dU_{\text{вс}}}{dZ} \cdot \frac{dU}{dU_{\text{вс}}} \cdot \frac{da}{dU} = \frac{da}{dd}. \quad (2.2)$$

При построении индуктивного прибора особо важным является правильный выбор параметров и принципиальной схемы индуктивного преобразователя.

Индуктивные преобразователи

В применяемых в настоящее время индуктивных преобразователях изменение индуктивного сопротивления катушки чаще всего достигается посредством изменения величины воздушного зазора δ между якорем и неподвижной частью сердечника катушки (рис. 2.1, а) или изменением площади зазора S (рис. 2.1, б). Характеристика преобразователя $Z = \varphi(\delta)$ (рис. 2.3, а) нелинейная, но если ограничить рабочий участок преобразователя $\Delta\delta = \delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}$, то можно считать, с некоторой погрешностью, что передаточное отношение $K = \frac{dZ}{dd}$ постоянно.

Передаточное отношение преобразователя возрастает по мере уменьшения зазора. Причем если взять два одинаковых рабочих участка $\Delta\delta$, но с различными значениями δ_0 то нелинейность характеристики (непостоянство величины $K_{\Pi\Pi}$) будет больше у преобразователя с меньшим δ_0 .

Преобразователи с переменным зазором позволяют получать высокие передаточные отношения.

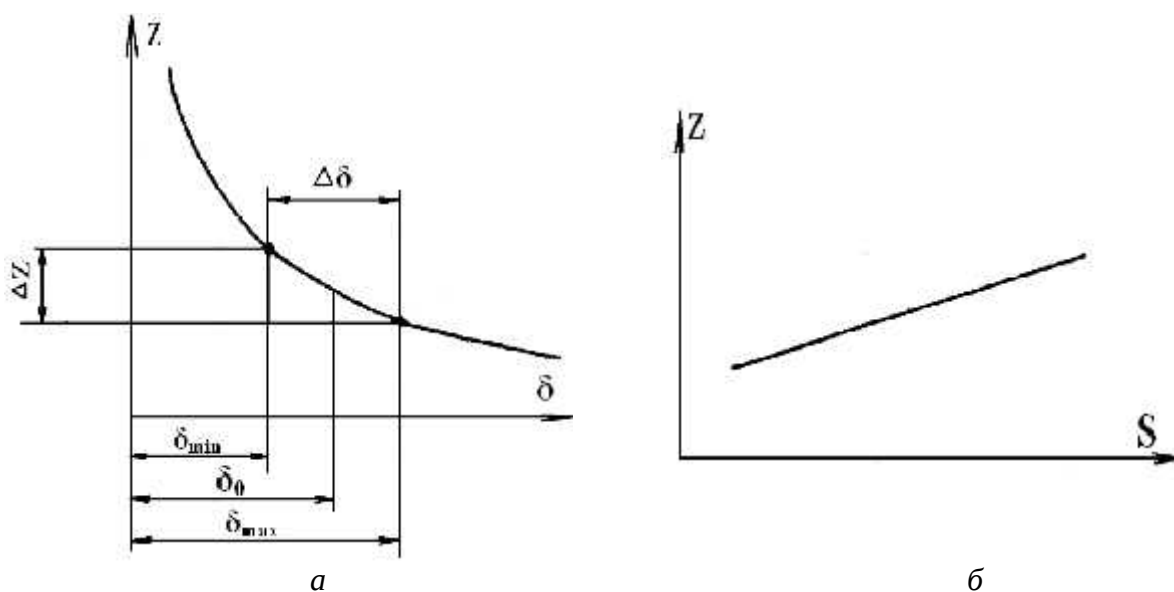


Рисунок 2.3 – Статические характеристики преобразователей

С целью получения более линейной зависимости, не уменьшая величины $\Delta\delta$, применяют индуктивные преобразователи, принцип действия которых показан на рис. 2.4, а. Преобразователь имеет две магнитные цепи с общим якорем. Под действием измеряемой величины оба зазора изменяются одинаково, но с различными знаками. Такой преобразователь обычно называют дифференциальным.

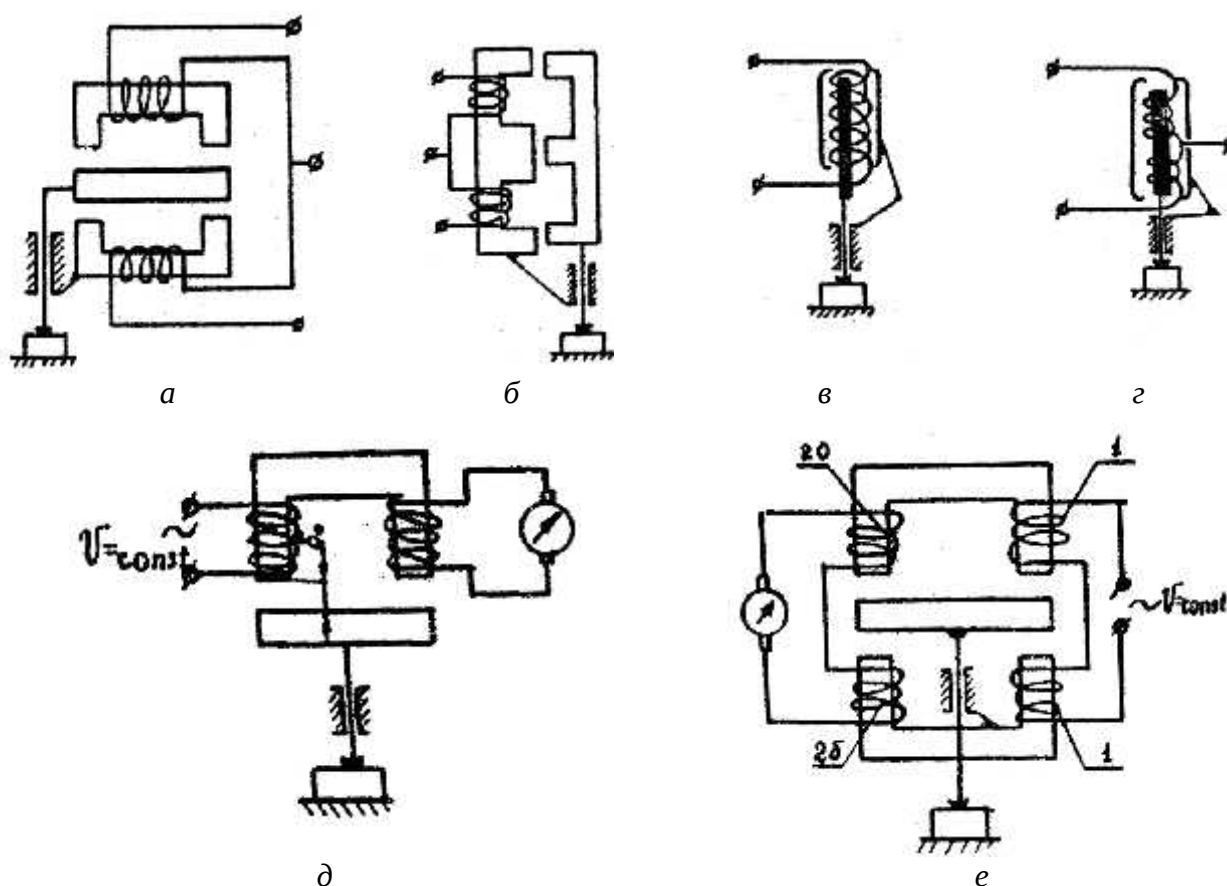


Рисунок 2.4 – Схемы индуктивных преобразователей

При соответствующем включении обеих катушек в измерительную схему (например, в соседние плечи мостовой схемы) дифференциальный преобразователь имеет примерно в два раза большую чувствительность по сравнению с недифференциальным, менее чувствителен к колебаниям окружающей температуры, питающего напряжения и его частоты. Поэтому эти преобразователи находят самое широкое применение в приборах для линейных измерений.

Индуктивные преобразователи с переменной площадью воздушного зазора имеют линейную характеристику $Z = \varphi(S)$ (рис. 2.3, б), но не высокую чувствительность, используются для измерения больших перемещений. Дифференциальная схема данного типа преобразователя (рис. 2.4, б) обладает аналогичными преимуществами.

Для измерения перемещений нескольких десятков миллиметров применяются преобразователи с разомкнутой магнитной цепью, так называемые преобразователи соленоидного типа.

На рис. 2.4 в, г приведены схемы дифференциального и недифференциального преобразователя соленоидного типа.

Преобразователь представляет собой катушку, внутри которой помещен ферромагнитный сердечник (якорь). При вхождении якоря внутрь катушки индуктивность последней изменяется.

Для целей повышения чувствительности катушка заключается в ферромагнитный кожух. Характеристика соленоидного преобразователя линейна, но в значительной степени зависит от качества намотки катушек. Катушки по всей своей длине должны быть строго идентичны как по числу витков, так и по геометрическим размерам.

Особую группу составляют преобразователи трансформаторного типа, в которых используется влияние линейного перемещения якоря на индуктивную связь между двумя катушками. На рис. 2.4, д показана принципиальная схема индуктивного преобразователя трансформаторного типа. Обмотка 1 питается от источника переменного тока. К зажимам второй обмотки 2 подключен вольтметр. При изменении воздушного зазора изменяется магнитное сопротивление магнитопровода, а, следовательно, и величина магнитного потока. В результате изменяется индуцированная во вторичной обмотке электродвижущая сила (ЭДС).

Схема недифференциального трансформаторного преобразователя (рис. 2.4, д) мало чувствительна.

Значительно лучшими свойствами обладает дифференциальный трансформаторный преобразователь (рис. 2.4, е).

Две одинаковые первичные катушки 1 обоих сердечников включены последовательно, благодаря чему при симметричном положении якоря магнитные потоки в обеих магнитных цепях равны. Вторичные катушки 2, также имеет одинаковые параметры, но включены навстречу друг другу. Поэтому при среднем положении якоря, индуцированные в них ЭДС, уравниваются друг друга и ток в измерителе равен нулю. При перемещении якоря из среднего положения магнитные сопротивления, а следовательно, и магнитные потоки, прони-

зывающие вторичные катушки, будут неодинаковыми, и в измерителе появится ток, определяемый разностью индуктированных во вторичных обмотках ЭДС.

Трансформаторные преобразователи обычно используются в схемах с усилителем, они позволяют осуществить дифференциальную схему сравнения выходных сигналов без гальванической связи между цепями входа и выхода.

2.3. Методика расчёта индуктивных преобразователей

Ниже будет рассмотрен приближенный расчет индуктивного преобразователя, изображенного на рис. 2.4, а.

При проектировании индуктивных преобразователей обычно заданными являются следующие параметры:

- предел измерения;
- допустимая степень нелинейности;
- габариты преобразователя;
- требуемая чувствительность;
- допустимое измерительное усилие.

Искомыми параметрами являются:

- передаточное отношение преобразователя $K = \frac{dZ}{dd}$;
- ток и напряжение питания катушки преобразователя;
- число витков, диаметр провода катушки;
- измерительное усилие преобразователя;
- начальный зазор δ_0 между якорем и неподвижной частью магнитопровода;
- материал;
- геометрические параметры магнитной цепи преобразователя.

Принципиальная схема расчета строится на том, что по заданным габаритам преобразователя находятся все его параметры. В случае несоответствия полученного передаточного отношения или измерительного усилия заданному значению ищутся пути их приближения, исходя из разработанной принципиальной схемы. В других случаях принимается решение в создании дополнительных усилительных устройств.

Расчет начинают из принципиального построения магнитной цепи и обмоток преобразователя, исходя из заданных габаритов.

Как правило, останавливаются на дифференциальном преобразователе с П-образной, Ш-образной или цилиндрической (в осевом сечении также имеет Ш-образную форму) формой магнитной цепи.

В качестве материала для магнитной цепи при питании преобразователя напряжением с частотой 50 Гц рекомендуется применять:

- для Ш и П-образных магнитопроводов – листовую сталь Э12, Э-21, Э-31, Э-41;
- для цилиндрических магнитопроводов – прутковую сталь типа Армко, СТ-10, Сталь 20, Сталь 35, Сталь 45.

При повышенной частоте питания преобразователя применяют материалы, обладающие очень большими удельными электрическими сопротивлениями – это листовой хромистый или молибденовый пермаллой или прессованные сердечники, из окислов некоторых металлов – так называемые ферриты.

По известной площади окна магнитопровода, предназначенного для размещения катушки, с учетом каркаса катушки, определяют количество витков W :

$$W = \frac{4 f_0 Q}{\pi d_1^2}, \quad (2.3)$$

где f_0 – коэффициент заполнения (выбирается по табл. 2.1) в зависимости от диаметра провода и марки изоляции;

Q – площадь, занимаемая обмоткой катушки, мм²;

d_1 – диаметр провода катушки преобразователя, мм.

Рекомендуется намотку катушек производить проводом высокого качества (марок ПЭЛШО, ПЭВ-2 и др.).

Таблица 2.1 – Коэффициент заполнения обмотки

Провод	ПЭЛ, ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШО
f_0	0,60	0,55	0,50

Сортамент эмалированных проводов приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Сортамент эмалированных проводов

Диаметр провода по меди, мм	Сечение полого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм			
		ПЭЛ	ВЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШО
0,05	0,00196	0,065	–	–	0,12
0,06	0,00288	0,075	0,085	0,09	0,13
0,07	0,00385	0,085	0,095	0,10	0,14
0,08	0,00502	0,095	0,108	0,11	0,15
0,09	0,00687	0,105	0,115	0,12	0,16
0,1	0,00785	0,12	0,125	0,13	0,175
0,11	0,00950	0,13	0,135	0,14	0,185
0,12	0,0113	0,14	0,145	0,15	0,195
0,13	0,0132	0,15	0,155	0,16	0,205
0,14	0,0158	0,16	0,165	0,17	0,215
0,15	0,0176	0,17	0,18	0,19	0,225
0,16	0,0201	0,18	0,19	0,20	0,235
0,17	0,0227	0,19	0,20	0,21	0,245
0,18	0,0254	0,20	0,21	0,22	0,255
0,19	0,0283	0,21	0,22	0,23	0,265

Диаметр провода по меди, мм	Сечение полого провода, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм			
		ПЭЛ	ВЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШО
0,2	0,0314	0,225	0,23	0,24	0,29
0,21	0,0346	0,235	0,24	0,25	0,30
0,23	0,0415	0,255	0,27	0,28	0,32
0,25	0,0440	0,275	0,29	0,30	0,34
0,27	0,0572	0,31	0,31	0,32	0,37
0,29	0,0660	0,33	0,33	0,34	0,39

Заданный предел измерения $\Delta\delta$ и допустимая степень нелинейности характеристики преобразователя определяют такой конструктивный параметр, как начальный зазор δ_0 между якорем и неподвижным сердечником катушки преобразователя, который выбирается из условия:

$$\frac{Dd}{d_0} \leq 0,15...0,2. \quad (2.4)$$

В этом случае нелинейность характеристики у дифференциальных преобразователей до 1 %, а у недифференциальных до 10 %.

При конструировании магнитопровода, особенно из сплошной стали, необходимо учитывать, что при слишком большой ширине полюса a (рис. 2.5) и малом зазоре δ_0 магнитный поток под средней частью полюса практически проводить не будет, вследствие вытеснения потока к краям полюса. При увеличении зазора сопротивление его будет мало изменяться, так как увеличение δ_0 будет сопровождаться увеличением фактической площади зазора S , что приводят к снижению чувствительности.

Поэтому рекомендуется:

$$\frac{d_0}{a} > 0,1...0,2. \quad (2.5)$$

Для уменьшения влияния изменения характеристик магнитного материала на параметры катушек величину индукции B в магнитопроводе выбирают такой, при которой магнитная проницаемость данного материала достигает минимального значения.

Для большинства магнитных материалов такое эффективное значение индукции B лежит в пределах:

$$B = 0,2...0,6 \text{ Тл}. \quad (2.6)$$

Когда построена принципиальная схема магнитной цепи преобразователя, выбран начальный зазор, индукция в магнитопроводе, определено число витков и диаметр провода дальнейший расчет ведут по следующей схеме:

1. Определяется полное магнитное сопротивление магнитопровода $Z_{\Sigma M}$,

которое включает сопротивления воздушных зазоров и сопротивление стальной части магнитопровода.

2. По найденной величине $Z_{\Sigma M}$, определяется полное электрическое сопротивление катушки преобразователя.

3. Определяется ток необходимый для получения выбранной магнитной индукции.

4. Проверяется катушка на допустимую плотность тока. Рекомендуется, чтобы плотность тока j , А/мм² не превышала

$$j \leq 2...2,5 \text{ А/мм}^2. \quad (2.7)$$

Для малогабаритных преобразователей допускаемая плотность тока может быть повышена до $j \leq 4,5 \text{ А/мм}^2$.

5. Определяется напряжение питания катушки.

6. Строится характеристика преобразователя $K_{инп} = \frac{DZ}{Dd}$, определяется его передаточное отношение.

7. Определяется измерительное усилие преобразователя.

2.3.1. Порядок расчета индуктивного преобразователя с П-образным и Ш-образным сердечником и плоским якорем

Расчет преобразователя с П-образным сердечником (рис. 2.4, а) является частным случаем расчета преобразователя с Ш-образным сердечником (рис. 2.5, а), поэтому будем рассматривать только последний.

Магнитная цепь (рис. 2.5, б) обычно выполняется симметричной относительно среднего сердечника, на котором расположена катушка (изображена жирными линиями). Поэтому достаточно рассчитать одну её половину, уменьшив сечение среднего сердечника вдвое и сохранить ту же величину намагничивающей силы катушки.

Изложение принципов расчета данного индуктивного преобразователя будем проводить совместно с решением конкретного примера.

Пример.

Исходные данные для расчета следующие:

- предел измерения $Dd = 0,2 \text{ мм} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- измерительное усилие не более 3 Н;
- передаточное отношение 500 ... 800 Ом/мм;
- частота питающего напряжения 50 Гц.

Из заданных габаритов (рис. 2.5, а) имеем:

$$c = 16 \text{ мм} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$h = 30 \text{ мм} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a = f = t = b = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

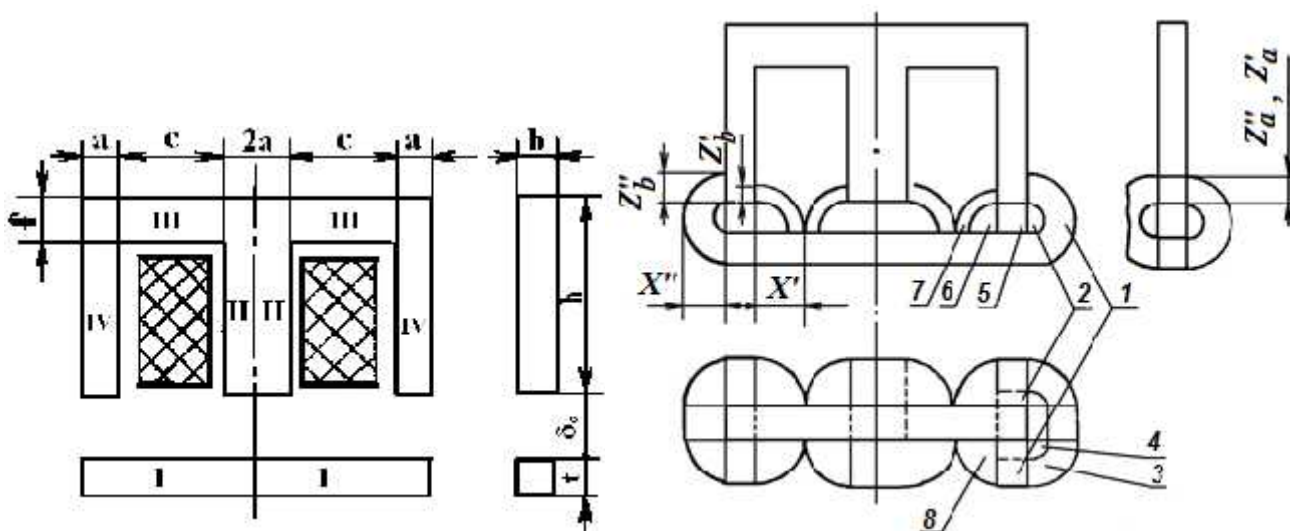


Рисунок 2.5 – Индуктивный преобразователь с Ш-образным сердечником

Расчет:

1. *Определяем количество витков W катушки*

Количество витков W катушки определяем согласно выражению (2.3), предварительно задавшись:

- $d_1 = 0,2 \text{ мм} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (провод марки ПЭВ-2);
- $f_0 = 0,55$ (табл. 2.1);
- толщина стенок каркаса катушки 1,5 мм.

$$W = \frac{4 f_0 Q}{\rho d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,55 \cdot ((16 - 3,5) \cdot (30 - 5 - 2 \cdot 1,5))}{3,14 \cdot 0,2^2} = 4800.$$

2. *Определяем начальный зазор*

Согласно выражения (2.4) определяем начальный зазор, мм:

$$\frac{Dd}{d_0} = \frac{0,2}{d_0} \leq 0,15 \dots 0,2, \text{ следовательно, } d_0 \geq 1 \dots 1,3.$$

3. *Задаемся величиной индукции в среднем сердечнике*

Согласно (2.6) – $B_{II} = 0,2 \text{ Тл}$.

При расчете магнитной цепи удобно использовать схемы замещения. Схема замещения (рис. 2.6) составляется сообразно конфигурации магнитопровода. Все участки магнитных сопротивлений цепи на схеме обозначены сосредоточенными магнитными сопротивлениями, а ЭДС катушки K показана как источник потока.

Так как рассматриваемая цепь симметрична, мы условно примем, что магнитное сопротивление среднего сердечника состоит из двух равных параллельно включенных сопротивления сердечника Z_{MII} и двух равных сопротивлений воздушных зазоров $R_{\delta II}$.

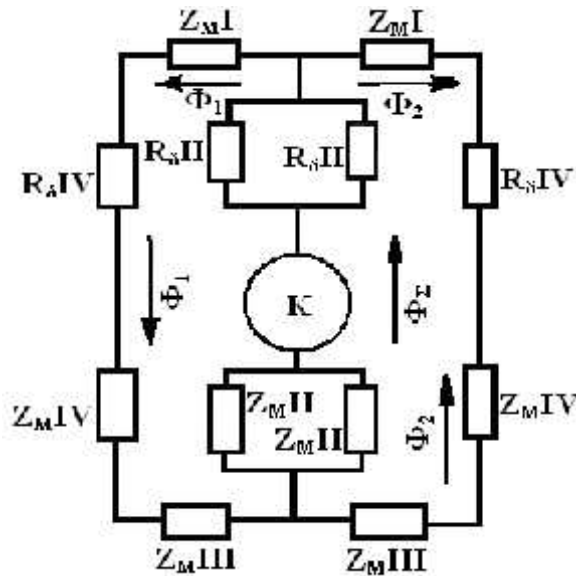


Рисунок 2.6 – Схема замещения

Для любой половины магнитопровода полное магнитное сопротивление цепи Z'_{SM} будет равно сумме сопротивлений остальных участков цепи Z_{Mi} и сумме сопротивлений двух воздушных зазоров $R_{\delta i}$:

$$Z'_{SM} = Z_{MI} + Z_{MII} + Z_{MIII} + Z_{MIV} + R_{\delta II} + R_{\delta IV}. \quad (2.8)$$

Суммарное магнитное сопротивление ввей цепи будет равно:

$$Z_{SM} = \frac{Z'_{SM}}{2}. \quad (2.9)$$

Общий магнитный поток Φ_{Σ} , создаваемый катушкой преобразователя будет равен

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi_1, \quad (2.10)$$

где $\Phi_{1(2)}$ – магнитный поток правой или левой половины магнитопровода, Вб.

4. Определение магнитного сопротивления воздушных зазоров.

При расчетах обычно пользуются магнитной проводимостью G воздушных зазоров – величиной обратной сопротивлению R_{δ} .

Точность расчета преобразователя в основном определяется точностью определения проводимости воздушных зазоров.

Магнитное поле в зазоре не является плоскопараллельным, магнитный поток выпучивается из-под полюсов. Поэтому для расчета проводимости воздушного зазора применяют метод разбивки (метод Ротерса) магнитного поля на простые геометрические фигуры, проводимость которых затем и определяется по известным формулам, приведенным в табл. 2.3.

В нашем случае поле разбивается на восемь простых фигур (рис. 2.5, б).

Координаты поля выпучивания X' , X'' , Z'_a , Z''_a , Z'_b , Z''_b определяется по графику на рис. 2.7 и ниже приведенным рекомендациям.

Координата X' обычно принимается равной $c/2$:

$$C' = \frac{c}{2} = \frac{16 \cdot 10^{-3}}{2} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Из рис. 2.7 по известной величине $\frac{C'}{d_{\max}}$ определяем $\frac{Z'_b}{d_{\max}}$.

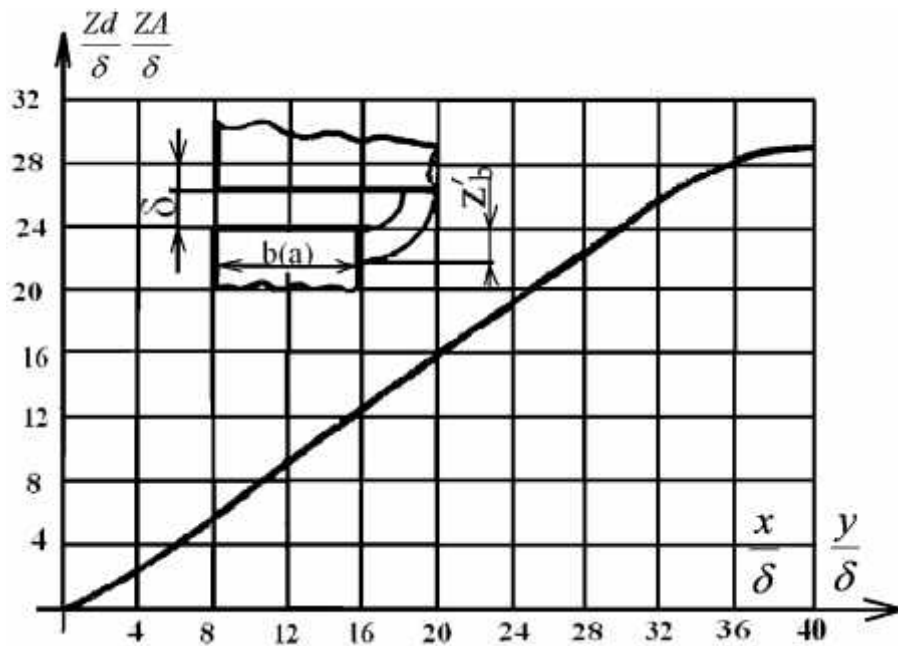


Рисунок 2.7 – Координаты поля выпучивания

Расчет удобно начинать с максимальной величины воздушного зазора $d_{\max} = d_0 + \frac{Dd}{2}$, при которой ток проходящий через катушку преобразователя имеет наибольшее значение. И если при этих условиях определить параметры катушки, то плотность тока, в процессе работы преобразователя, не превысит расчетной величины.

$$\frac{X'}{d_{\max}} = \frac{8}{1,3 + \frac{0,2}{2}} \approx 5,7;$$

$$\frac{Z'_b}{1,4} = 4; \quad \text{отсюда} \quad Z'_b = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

С достаточной для практики точностью рекомендуется принимать

$$Z'_a = Z''_a = Z''_b = t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По известной величине $\frac{Z''_b}{d_{\max}}$ и по графику на рис. 2.7 определяем $\frac{X''}{d_{\max}}$.

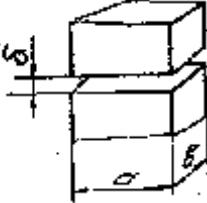
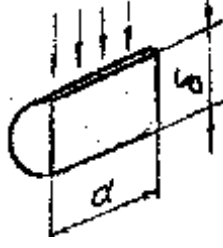
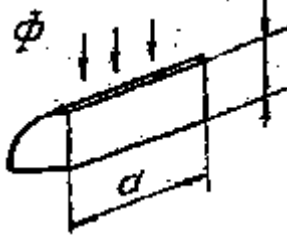
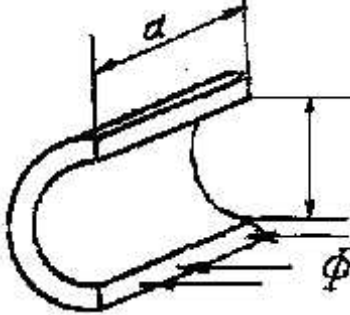
$$\frac{Z''_b}{d_{\max}} = \frac{5}{1,4} \approx 3,5;$$

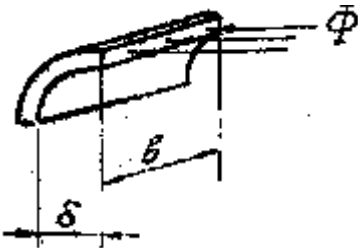
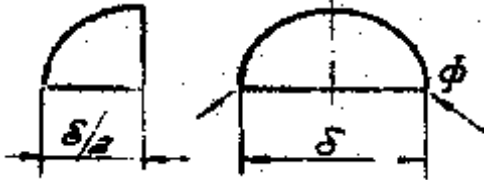
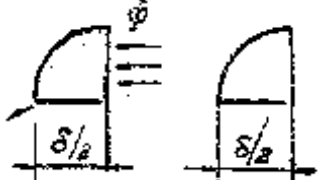
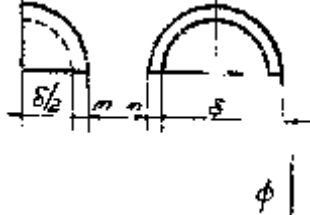
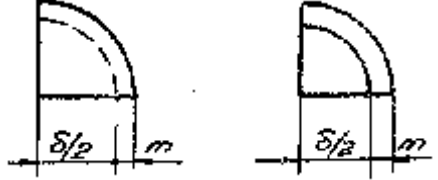
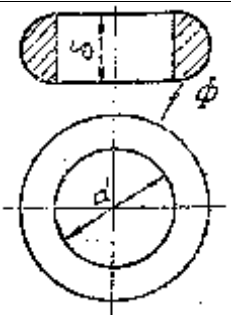
$$\frac{X''}{1,4} \approx 5; \quad \text{отсюда} \quad X'' = 7 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

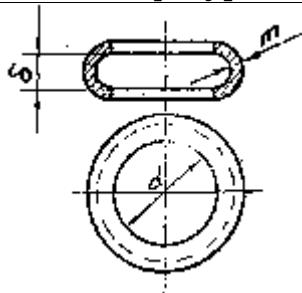
5. Определение проводимости отдельных фигур.

Проводимости отдельных фигур определяются по формулам табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Основные фигуры аналитическое выражение их магнитных проводимостей

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
	$G = m_0 \frac{ab}{d}$
 Полуцилиндр	$G = 0,25m_0a$
 Четверть цилиндра	$G = 0,52m_0a$
 Половина полоого цилиндра	$G = m_0 \frac{2a}{p(\frac{d}{m} + 1)}$ $m = \frac{z'_b + (x'' + 0,5a)}{2}$

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
 Четверть полого цилиндра	$G = m_0 \frac{2b}{\rho \left(\frac{d}{m} + 0,5 \right)}$ $m = \frac{z'_b + (x' - d)}{2}$
 Сферический квадрант	$G = 0,077 m_0 d$
 Половина сферического квадранта	$G = 0,308 m_0 d$
 Квадрант сферической оболочки	$G = m_0 \frac{m}{4}$ $m = \frac{z'_b + (x'' - 0,5d)}{2}$
 Половина квадранта сферической оболочки	$G = m_0 \frac{m}{2}$ $m = \frac{z'_b + (x'' - 0,5d)}{2}$
 Тело вращения (полуцилиндр)	$G = 0,26 \rho m_0 d$

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
 Тело вращения (полукольцо)	$G = \mu_0 \frac{2d}{\frac{d}{m} + 1}$ $m = \frac{z''_b + (x'' - 0,5d)}{2}$

5.1. Проводимость половины полого цилиндра G (фигура 2, рис. 2.5, б).
Таких фигур в зазоре δ_{II} – две штуки, а в зазоре δ_{IV} – три штуки.

$$G_1 = \mu_0 \frac{2b}{p \left(\frac{d_{max}}{m_1} + 1 \right)},$$

где m_1 – средняя толщина стенки цилиндра.

Среднюю толщину стенки цилиндра находим из выражения:

$$m_1 = \frac{z''_b + \left(x'' - \frac{d_{max}}{2} \right)}{2}.$$

$$m_1 = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} + 6,3 \cdot 10^{-3}}{2} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

5.2. Проводимость половины цилиндра (фигура 2). Для зазора δ_{IV} имеется три таких фигуры, а для δ_{II} – две.

Тогда:

$$G_2 = \mu_0 0,26b.$$

5.3. Проводимость квадранта полого шара (фигура 3). Только у зазора δ_{IV} , имеется две таких фигуры. Тогда:

$$G_3 = \mu_0 \frac{m_1}{4}.$$

5.4. Проводимость шарового квадранта (фигура 4). Две таких фигуры только у зазора δ_{IV} , значит:

$$G_4 = \mu_0 0,077d.$$

5.5 Проводимость зазора под полюсами (фигура 5) по одной фигуре у каждого полюса:

$$G_5 = m_0 \frac{a \cdot b}{d}.$$

5.6. Проводимость четверть цилиндра (фигура 6). По одной фигуре у каждого зазора:

$$G_6 = m_0 0,52b.$$

5.7. Проводимость четверть полого цилиндра (фигура 7). По одной фигуре у каждого зазора:

$$G_7 = m_0 \frac{2b}{\rho \left(\frac{d}{m_2} + 0,5 \right)};$$

$$\text{где } m_2 = \frac{Z'_b + (X' - d_{\max})}{2}$$

$$m_2 = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} + (8 - 1,4) \cdot 10^{-3}}{2} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

5.8. Проводимость G_8 квадрантов сложной формы заключенных между фигурами 6, 7 и 1, 2 рекомендуется принимать:

$$G_8 = 2G_3 + 2G_4.$$

Общая магнитная проводимость воздушных зазоров определится как сумма их составляющих.

Для зазора d_{IV} :

$$G_{dIV} = 3G_1 + 3G_2 + 2G_3 + 2G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + 2(2G_3 + 2G_4) =$$

$$G_{dIV} = m_0 \left[\frac{6b}{\rho \left(\frac{d_{\max}}{m_1} + 1 \right)} + 1,3b + 1,5m_1 + 0,46d_{\max} + \frac{ab}{d_{\max}} + \frac{2b}{\rho \left(\frac{d_{\max}}{m_2} + 0,5 \right)} \right], \quad (2.11)$$

где $m_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$

После подстановки получаем:

$$G_{dIV} = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot \left[\frac{6 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,14 \left(\frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} + 1 \right)} + 1,3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} + 0,46 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} + \right.$$

$$\left. + \frac{5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{\rho \left(\frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \right)} \right] = 57 \cdot 10^{-9} \Gamma \text{н.}$$

Сопротивление этого зазора:

$$R_{dIV} = \frac{1}{G_{dIV}} = \frac{1}{57 \cdot 10^{-9}} = 175 \cdot 10^5 \text{ 1/}\Gamma \text{н.}$$

Для зазора d_{II} :

$$G_{dII} = 2G_1 + 2G_2 + G_5 + G_6 + G_7 + 2(2G_3 + 2G_4) =$$

$$= m_0 \left[\frac{4b}{\rho \left(\frac{d_{max}}{m_1} + 1 \right)} + 0,52b + \frac{a \cdot b}{d_{max}} + \frac{2b}{\rho \left(\frac{d_{max}}{m_2} + 0,5 \right)} + m_1 + 3,08d_{max} \right], \quad (2.12)$$

После подстановки получаем:

$$G_{dII} = 51 \cdot 10^{-9} \Gamma \text{н.}$$

Сопротивление этого зазора:

$$R_{dII} = \frac{1}{G_{dII}} = \frac{1}{51 \cdot 10^{-9}} = 196 \cdot 10^5 \text{ 1/}\Gamma \text{н.}$$

6. Определение магнитного сопротивления стальных участков цепи.

Комплексное сопротивление стального сердечника определяется по формуле

$$z_{mi} = (r_{Ri} + jr_{xi}) \frac{l_i}{S_i},$$

где r_{Ri}, r_{xi} – удельное реактивное и активное магнитное сопротивление, $\text{м/}\Gamma \text{н.}$

Определяются по экспериментальным графикам (рис. 2.8) в зависимости от величины магнитной индукции B_i ;

l_i, S_i – средняя длина и поперечное сечение i -го сердечника.

Для нашего случая магнитная индукция в среднем сердечнике $B=0,2$ Тл, а его магнитный поток составляет:

$$\Phi_{\Sigma} = B_{II} \cdot S_{II} = 0,2 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Следовательно: $\Phi_1 = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$

По потоку Φ_1 определяют величины индукции в каждом звене магнитопровода.

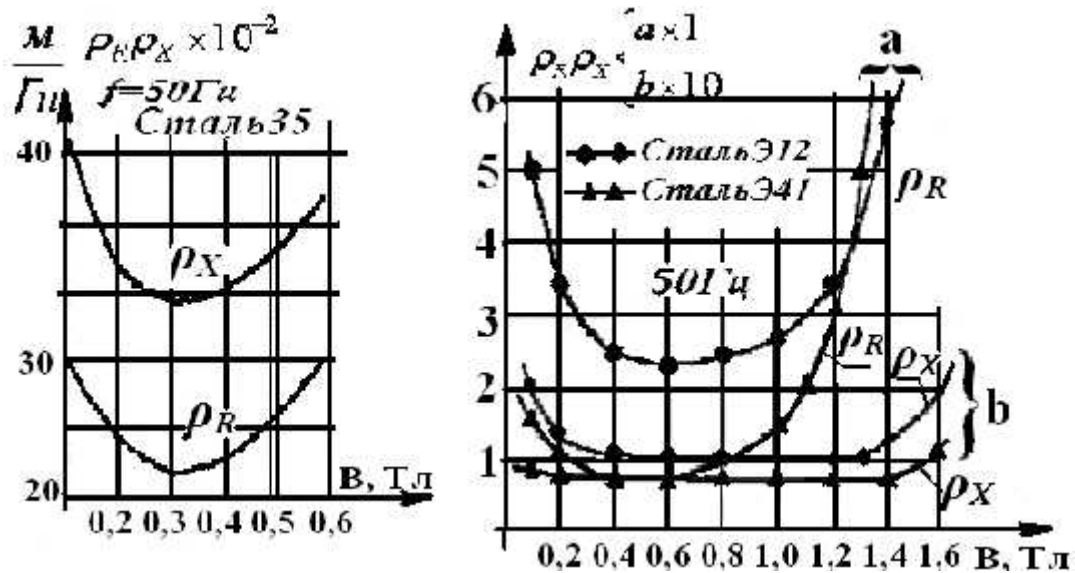


Рисунок 2.8 – Экспериментальные графики для определения r_{Ri}, r_{xi}

Так как поперечное сечение звеньев I, III, IV равны (5x5), то и величины индукции этих звеньев будут также равны:

$$B_I = B_{II} = B_{IV} = \frac{0,5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 0,2 \text{ Тл.}$$

Для этого значения индукции по графикам (рис. 2.8, б) для стали Э-12 определяем:

$$r_R = 4,8 \cdot 10^2 \text{ м/Гн}, \quad r_x = 1,1 \cdot 10^2 \text{ м/Гн},$$

$$z_{MI-IV} = z_{MI} + z_{MII} + z_{MIII} + z_{MIV} = (r_R + jr_x) \frac{l_{I-IV}}{S}$$

$$z_{MI-IV} = (4,8 \cdot 10^2 + j \cdot 1,1 \cdot 10^2) \cdot \frac{(2 \cdot c \cdot 2(h-f) + 2 \cdot 0,5p \cdot 0,5a + 2 \cdot 0,5p \cdot 0,5t) \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= (14,4 + j \cdot 3,3) \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.}$$

Суммарное магнитное сопротивление одной половины магнитной цепи преобразователя:

$$z'_{SM} = z_{MI-IV} + R_{dII} + R_{dIV} \quad (2.13)$$

$$z'_{SM} = (14,4 + j3,3) \cdot 10^5 + 175 \cdot 10^5 + 196 \cdot 10^5 = (385,4 + j3,3) \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.}$$

Суммарное магнитное сопротивление всей цепи составит:

$$z_{SM} = \frac{z'_{SM}}{2} = (192,7 + 1,65j) \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.} \quad (2.14)$$

Модуль этого сопротивления:

$$Z_{SM} = \sqrt{192,7^2 + 1,65^2} \cdot 10^5 \approx 192,7 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.}$$

Полное комплексное электрическое сопротивление катушки преобразователя определяется из следующей формулы:

$$Z = R_a + \frac{w w^2 x_M}{(Z_{SM})^2} + j \frac{w w^2 R_M}{(Z_{SM})^2}, \quad (2.15)$$

где R_a – активное (омическое) сопротивление катушки преобразователя, равное

$$R_a = r \frac{l_{cp}}{q} W, \quad (2.16)$$

здесь ρ – удельное сопротивление (для медной проволоки $r = 0,0175$ Ом/мм²/м);

l_{cp} – средняя длина витка, м (рис. 2.9);

q – поперечное сечение полого провода (табл. 2.2).

Подставляя исходные данные, получим:

$$R_a = 0,0175 \cdot \frac{10^{-3} \cdot 80 \cdot 4800}{0,0201} = 334 \text{ Ом.}$$

$\frac{w w^2 x_M}{(Z_{SM})^2}$ – активное сопротивление преобразователя из-за потерь в стали на

гистерезис и вихревые токи, Ом;

$w = 2\pi f_0$ – круговая частота, где f_0 – частота в герцах.

Для нашего случая $X_M = 1,65 \cdot 10^5$;

$j \frac{w w^2 R_M}{(Z_{SM})^2}$ – реактивное индуктивное сопротивление катушки, Ом,

$R_M = 192,7 \cdot 10^5$ 1/Гн;

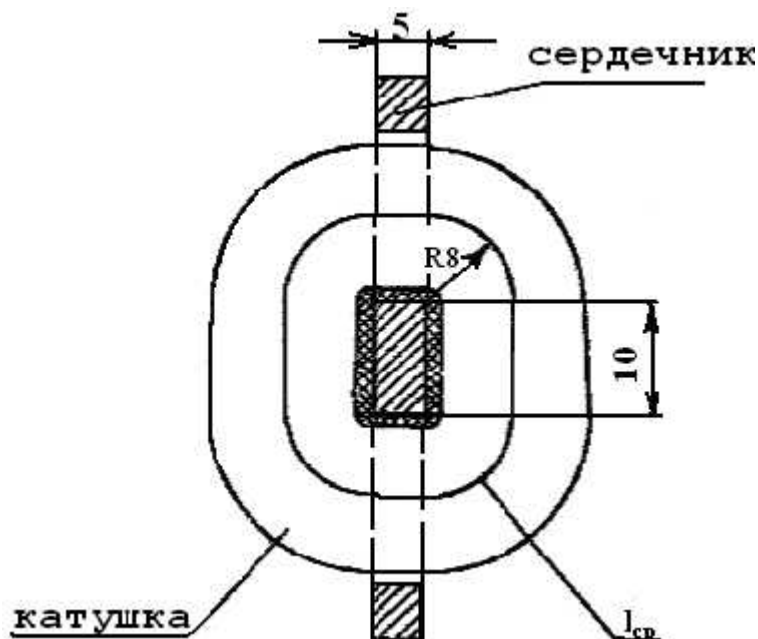


Рисунок 2.9 – Вид преобразователя с Ш-образным сердечником

Находим модуль сопротивления:

$$Z = \sqrt{\left(R_a + \frac{W W^2 X_M}{(Z_{SM})^2}\right)^2 + \left(\frac{W W^2 R_M}{(Z_{SM})^2}\right)^2}$$

$$Z = \sqrt{\left(334 + \frac{2p \cdot 50 \cdot 4800^2 \cdot 1,65 \cdot 10^5}{(192,7 \cdot 10^5)^2}\right)^2 + \left(\frac{2p \cdot 50 \cdot 4800^2 \cdot 192,7 \cdot 10^5}{(192,7 \cdot 10^5)^2}\right)^2} = 390 \text{ Ом.}$$

Эффективное значение тока, протекающего через катушку преобразователя для создания выбранного магнитного потока будет равно:

$$I = \frac{F_s \cdot Z_{SM}}{W \cdot \sqrt{2}} = \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 192,7 \cdot 10^5}{4800 \cdot \sqrt{2}} = 0,028 \text{ А.}$$

Плотность тока в обмотке:

$$J = \frac{I}{q} \leq J_{\text{дон}} = 2...2,5 \text{ А/мм}^2,$$

$$J = \frac{0,028}{0,0201} = 1,41 \text{ А/мм}^2.$$

Напряжение питания катушки будет равно

$$U = Z \cdot I = 0,028 \cdot 390 = 11 \text{ В.}$$

Для приближённого определения передаточного отношения преобразователя и определения измерительного усилия необходимо определить полное сопротивление магнитной цепи и полное сопротивление катушки при наименьшем зазоре $d_{\min}$:

$$d_{\min} = d_0 - \frac{Dd}{2} = 1,3 - \frac{0,2}{2} = 1,2 \text{ мм.}$$

При выполнении повторного расчёта при зазоре $d_{\min}$ сопротивления стальных участков будем считать неизменными. Для этих условий $Z'_b = 6 \cdot 10^{-3} \text{ М}; X'' = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ М}; m_1 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ М}; m_2 = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ М.}$

Согласно формул (2.11) и (2.12) получим:

$$G_{dIV} = 63,5 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dIV} = \frac{1}{63,5 \cdot 10^{-9}} = 158 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн};$$

$$G_{dII} = 54 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dII} = \frac{1}{54 \cdot 10^{-9}} = 185 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн.}$$

Суммарное магнитное сопротивление одной половины цепи согласно (2.13) равно:

$$Z'_{SM} = (357 \cdot j3,3) \cdot 10^5 \text{ 1/Гн},$$

а сопротивление всей цепи согласно (2.14) равно:

$$Z_{SM} = (178,7 \cdot j1,65) \cdot 10^5 \text{ 1/Гн},$$

Модуль этого сопротивления:

$$Z_{SM} = 178,7 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн}.$$

Наконец, согласно с формулой (2.15) получим модуль полного электрического сопротивления катушки:

$$Z = 550 \text{ Ом}.$$

Таким образом, при изменении зазора между якорем и неподвижным сердечником на величину $Dd = 0,2 \text{ мм}$ сопротивление катушки изменилось на величину $DZ = 550 - 390 = 160 \text{ Ом}$. Считая, что передаточное отношение K_{un} на всём пределе измерения постоянно, определим его значение:

$$K_{un} = \frac{DZ}{Dd} = \frac{160}{0,2} = 800 \text{ Ом/мм}.$$

Для построения характеристики преобразователя $Z = j(d)$ определяются для нескольких значений (в пределах рабочего хода якоря) величины сопротивлений преобразователя.

Измерительное усилие $F_{из}$ преобразователя определяется, исходя из величины максимальной электромеханической силы притяжения $F_э$ якоря к сердечнику, которая определяется по приближённой формуле, полученной из формулы Максвелла. Для недифференциального преобразователя сила притяжения одного полюса равна:

$$F_э = (IW)^2 \frac{m_0 S}{d^2}. \quad (2.17)$$

Эта формула справедлива для определения величины электромагнитной силы, действующей между двумя параллельными плоскостями, находящимися на небольшом расстоянии (1-2 мм).

У дифференциального преобразователя на якорь действует разность сил, направленная в сторону меньшего зазора и равная

$$F_{э0} = (IW)^2 \frac{m_0 S}{\left(d_0 - \frac{Dd}{2}\right)^2} - (IW)^2 \frac{m_0 S}{\left(d_0 + \frac{Dd}{2}\right)^2} = (IW)^2 m_0 S \left[\frac{1}{\left(d_0 - \frac{Dd}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(d_0 + \frac{Dd}{2}\right)^2} \right] \quad (2.18)$$

Для нашего примера (дифференциальный преобразователь) на одну пару полюсов разность сил составит:

$$F_{э0} = (0,028 \cdot 4800)^2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot \left[\frac{1}{(1,3 - 0,1)^2} - \frac{1}{(1,3 + 0,1)^2} \right] = 0,1 \text{ Н}.$$

На четыре пары полюсов: $F_{эд} = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ Н}$.

Измерительное усилие $F_{из}$ преобразователя должно быть больше электро-механической силы в 5-10 раз.

Примем его равным 3 Н.

2.3.2. Порядок расчёта индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником и плоским якорем

Порядок расчёта индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником и плоским якорем рассмотрим на примере.

Схема индуктивный преобразователя с цилиндрическим сердечником представлена на рис. 2.10.

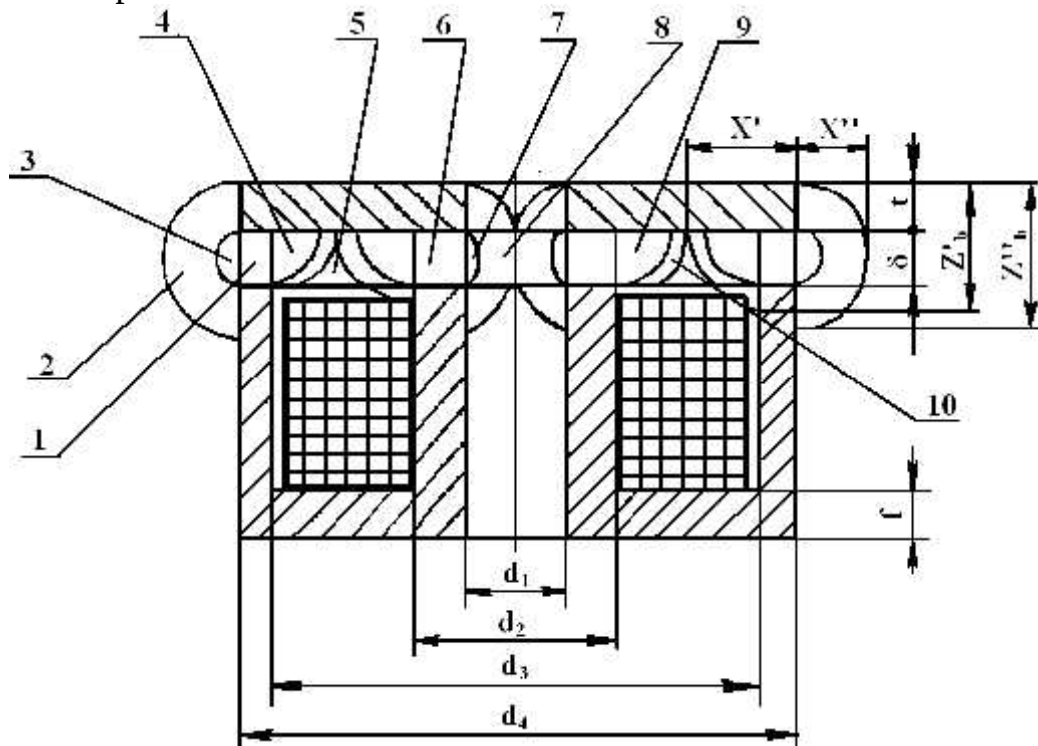


Рисунок 2.10 – Индуктивный преобразователь с цилиндрическим сердечником

Исходные данные:

- пределы измерения $\Delta d = 0,1 \text{ мм}$;
- измерительное усилие не более 4 Н;
- передаточное отношение 400 – 1000 Ом/мм;
- частота питающего напряжения 50 Гц.

Из заданных габаритов (рис. 2.10) имеем:

$$d_1 = 5 \text{ мм}; d_2 = 11 \text{ мм}; d_3 = 26 \text{ мм}; d_4 = 30 \text{ мм}; h = 30 \text{ мм}; t = f = 3 \text{ мм};$$

1. Определяем начальный зазор

Согласно выражению (2.4) определим начальный зазор:

$$\frac{Dd}{d_0} = \frac{0,1}{d_0} \leq 0,15 \dots 0,2,$$

$$d_0 \geq 0,5 \dots 0,7 \text{ примем } d_0 = 0,5 \text{ мм}.$$

2. Определяем количество витков катушки

Согласно выражению (2.3) определим количество витков катушки.

Принимаем $d=0,2$ мм, провод марки ПЭВ-2, $f_0=0,55$ (табл. 2.1), толщина стенок каркаса 1 мм, следовательно:

$$W = \frac{4 \cdot 0,55 \cdot 6 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{\rho \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 4200.$$

3. Задаемся величиной индукции в среднем сердечнике: $B = 0,2$ Тл.

Цилиндрический преобразователь имеет 2 кольцевых зазора. Разбиваем поле в зазорах на 10 простых геометрических фигур (рис. 2.10).

Определяем координаты поля выпучивания:

$$X' = \frac{d_3 - d_2}{4} = \frac{26 - 11}{4} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (2.19)$$

$$Z''_b = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

По величине $\frac{X'}{0,55} = \frac{3,75}{0,55} = 6,85$ по графику (рис. 2.7) определяем

$$Z'_b = 2,85 \text{ мм}, \text{ а по величине } \frac{Z''_b}{d_{\max}} = \frac{3}{0,55} = 5,45 \text{ определяем } X'' = 8 \text{ мм} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Проводимость наружного зазора будет равна

$$G_{dI} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5,$$

а проводимость внутреннего зазора будет:

$$G_{dII} = G_6 + G_7 + G_8 + G_9 + G_{10}. \quad (2.20)$$

4. По формулам таблицы 3 определяем проводимость отдельных фигур:

4.1. Проводимость цилиндрического кольца (фигура 1, рисунок 2.10):

$$G_1 = m_0 \frac{S_1}{d_{\max}} = m_0 \frac{\rho(d_4^2 - d_3^2)}{4d_{\max}}. \quad (2.21)$$

4.2. Проводимость тела вращения (полуцилиндр, фигура 2):

$$G_2 = m_0 \frac{2l_1}{\rho \left(\frac{d_{\max}}{m_1} + 1 \right)}, \quad (2.22)$$

$$\text{где } l_1 = \rho d_4, \text{ а } m_1 = \frac{Z''_b + \left(X'' - \frac{d}{2} \right)}{2}, \text{ м}.$$

4.3. Проводимость тела вращения (полуцилиндр, фигура 3):

$$G_3 = m_0 \cdot 0,26l_1. \quad (2.23)$$

4.4. Проводимость тела вращения (четверть цилиндр, фигура 4):

$$G_4 = m_0 \cdot 0,52l_2, \quad (2.24)$$

где $l_2 = \rho d_3$.

4.5. Проводимость тела вращения (четверть кольца, фигура 5):

$$G_5 = m_0 \frac{2l_2}{\rho \left(\frac{d_m}{m_2} + 0,5 \right)}, \quad (2.25)$$

где $m_2 = \frac{Z'_b + (X' - d_{max})}{2}$, м.

4.6. Проводимость цилиндрического кольца (фигура 6):

$$G_6 = m_0 \frac{S_2}{d_{max}} = m_0 \frac{\rho (d_2^2 - d_1^2)}{4d_{max}}. \quad (2.26)$$

4.7. Проводимость тела вращения (получилиндр, фигура 7):

$$G_7 = m_0 \cdot 0,26l_3, \quad (2.27)$$

где $l_3 = \rho d_1$, м.

4.8. Проводимость тела вращения (полукольцо; фигура 8):

$$G_8 = m_0 \frac{2l_3}{\rho \left(\frac{d_{max}}{m_1} + 1 \right)}. \quad (2.28)$$

где $l_3 = \rho d_1$, м.

4.9. Проводимость тела вращения (четверть цилиндра; фигура 9):

$$G_9 = m_0 \cdot 0,52l_4, \quad (2.29)$$

где $l_4 = \rho d_2$, м.

4.10. Проводимость тела вращения (четверть кольца, фигура 10):

$$G_{10} = m_0 \frac{2l_4}{\rho \left(\frac{d}{m_2} + 0,5 \right)}. \quad (2.30)$$

5. Подставив числовые значения в выражения для $G_{\delta I}$ и $G_{\delta II}$ получим:

$$G_{dI} = 610 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dI} = \frac{1}{G_{dI}} = 16,5 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн};$$

$$G_{dII} = 171 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dII} = \frac{1}{G_{dII}} = 58,5 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн}.$$

Пренебрегая сопротивлением остальных участков магнитопровода, определяем суммарное магнитное сопротивление преобразователя:

$$R_{SM} = R_{dI} + R_{dII} = 16,5 \cdot 10^5 + 58,5 \cdot 10^5 = 75 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн}.$$

Полное комплексное электрическое сопротивление катушки преобразователя будет равно

$$Z = R_a + j \frac{w w^2 R_{SM}}{R_{SM}^2},$$

где $R_a = r \frac{l_{cp}}{q} \cdot W = \frac{0,0175 \cdot 2p \cdot 25 \cdot 10^{-3} \times 4200}{0,0201} = 211 \text{ Ом}.$

Модуль электрического сопротивления равен:

$$Z = \sqrt{R_a^2 + \left(\frac{w w^2 R_{SM}}{R_{SM}^2} \right)^2} = \sqrt{211^2 + 740^2} = 765 \text{ Ом}.$$

Эффективное значение тока, протекающего через катушку преобразователя для создания выбранного магнитного потока будет равно:

$$I = \frac{\Phi \cdot R_{SM}}{W \times \sqrt{2}} = \frac{0,2 \cdot p (11^2 - 5^2) \cdot 10^{-6} \cdot 75 \cdot 10^5}{4200 \cdot \sqrt{2} \cdot 4} = 0,018 \text{ А},$$

где $\Phi = B \cdot S$, Вб.

Плотность тока в обмотке равна:

$$J = \frac{I}{q} = \frac{0,018}{0,02} = 0,9 < Jg = 2...2,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Напряжение питания катушки

$$U = IZ = 0,018 \cdot 765 = 14 \text{ В}.$$

Для определения передаточного отношения и измерительного усилия определим электрическое сопротивление преобразователя при минимальном зазоре:

$$d_{\min} = d_0 - \frac{Dd}{2} = 0,5 - 0,05 = 0,45 \text{ мм};$$

$$C' = 3,75 \text{ мм}; \quad Z''_e = 3 \text{ мм}.$$

По величине $\frac{C'}{d_{\min}} = 8,35$ определяем (рис. 2.7) $Z'_e = 27 \text{ мм};$

а по величине $\frac{Z''_e}{d_{\min}} = \frac{3}{0,45} = 6,7$, $C'' = 4 \text{ мм}.$

Для этих значений согласно (2.21) – (2.30) получим

$$G_{dI} = 810 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dI} = 12,4 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн};$$

$$G_{dII} = 276 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}; \quad R_{dII} = 36,1 \cdot 10^5 \text{ 1/Гн}.$$

Пренебрегая сопротивлением стальных участков магнитопровода определим суммарное магнитное сопротивление

$$R_{SM} = R_{dI} + R_{dII} = 48,5 \times 10^5 \text{ 1/Гн}.$$

Модуль электрического сопротивления катушки преобразователя:

$$Z = \sqrt{211^2 + \left(\frac{2p \cdot 50 \cdot 4200^2 \cdot 48,5 \cdot 10^5}{(48,5 \cdot 10^5)^2} \right)^2} = 1165 \text{ Ом}.$$

Передаточное отношение $K_{un} \approx \frac{\Delta Z}{\Delta d} = \frac{1165 - 765}{0,1} = 4000 \text{ Ом/мм}.$

Измерительное усилие (считая преобразователь дифференциальным) будет равно

$$F_{из} \geq (5...10) \cdot F_{эд},$$

где $F_{эд} = F_{эд}^{\text{н}} + F_{эд}^{\text{в}};$

$F_{эд}^{\text{н}}$ – равнодействующая электромеханических сил наружных полюсов, Н;

$F_{эд}^{\text{в}}$ – равнодействующая электромеханических сил внутренних полюсов, Н.

$$F'_{эд} = (IW)^2 m_0 S' \left[\frac{1}{\left(d_0 - \frac{Dd}{2} \right)^2} - \frac{1}{\left(d_0 + \frac{Dd}{2} \right)^2} \right]$$

$$F'_{эд} = (0,018 \cdot 4200)^2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p(30^2 - 26^2)}{4} \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 \left[\frac{1}{(0,5 - 0,05)^2} - \frac{1}{(0,5 + 0,05)^2} \right] = 2,3 \text{ Н}$$

$$F''_{\partial} = (IW)^2 m_0 S'' \left[\frac{1}{\left(d_0 - \frac{Dd}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(d_0 + \frac{Dd}{2}\right)^2} \right]$$

$$F''_{\partial} = (0,018 \cdot 4200)^2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\rho(11^2 - 5^2)}{4} \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 \left[\frac{1}{(0,5 - 0,05)^2} - \frac{1}{(0,5 + 0,05)^2} \right] = 0,89 \text{ Н}$$

$$F_{\partial} = 2,3 + 0,89 = 3,19 \text{ Н}.$$

$$F_{uz} \geq (5 \dots 10) F_{\partial} \approx (16 \dots 32) \text{ Н}.$$

Измерительное усилие значительно превосходит заданную величину.

Для его уменьшения необходимо увеличить начальный зазор δ_0 , уменьшить площадь полюсов S_I и S_{II} и произвести повторный расчет всех искомых величин преобразователя.

3. РАСЧЁТ СИЛЬФОННЫХ ПНЕВМОЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

3.1. Цель работы

Целью выполнения расчётно-графического задания является углубленное изучение студентами принципов, методов и средств преобразования сигналов в пневматических измерительных приборах; освоение методик выбора параметров пневматических преобразующих устройств и расчета дифференциальных сильфонных пневмоэлектроконтактных преобразователей для линейных измерений в приборостроении.

3.2. Описание принципиальной схемы преобразователя

В пневматических устройствах, предназначенных для измерения малых перемещений линейных размеров используется зависимость между площадью проходного канала F и расходом G сжатого воздуха при постоянном давлении H на входе в систему. На рис. 3.1 показана пневматическая схема, согласно которой воздух под постоянным давлением H поступает к входному соплу 1 диаметром d_1 , а затем к измерительному соплу 2 диаметром d_2 . В зависимости от размера контролируемой детали изменяется величина зазора z между измерительным соплом 2 и заслонкой 3.

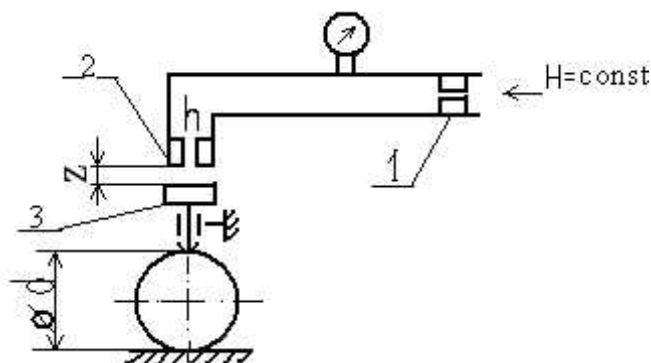


Рисунок 3.1 – Схема контактного пневматического преобразователя

Входное и измерительное сопла представляют собой пневмосопротивления турбулентного типа, расходная характеристика которых имеет следующий вид

$$G_1 = F_1 \alpha_1 e_1 \sqrt{2 r_1} \sqrt{H - h}, \quad (3.1)$$

$$G_1 = F_1 \alpha_1 e_1 \sqrt{2 r_1} \sqrt{H}, \quad (3.2)$$

где G_1, G_2 – расход воздуха через входное и измерительное сопла;

F_1, F_2 – площади истечения воздуха через входное и измерительное сопла

$$(F_1 = \pi d_1^2 / 4; F_2 = \pi d_2 z);$$

α_1, α_2 – коэффициент расхода воздуха;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициент, учитывающий изменение плотности воздуха при прохождении через пневмосопротивления.

В установившемся режиме течения воздуха расходы G_1 и G_2 равны. При малых перепадах давления воздуха на пневмосопротивлениях можно принять следующие допущения: $e_1 = e_2 \approx 1$; $\frac{a_2}{a_1} \approx 1$; $r_1 \approx r_2$.

Таким образом,

$$a_1 F_1 \sqrt{H - h} = a_2 F_2 \sqrt{h}, \quad (3.3)$$

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2}\right)^2 z^2}, \quad (3.4)$$

где H – избыточное рабочее давление воздуха, поступающего к входному соплу;

d_1 – диаметр входного сопла;

d_2 – диаметр измерительного сопла;

z – зазор между торцом сопла и заслонкой.

На рис. 3.2 показана пневматическая схема измерительного устройства для контроля диаметра вала.

Контролируемый вал 1 перемещается по направляющим 2 и проходит между измерительными наконечниками 3 и 4. Наконечники установлены в губках 5 и 6, закреплённых на подвижных каретках 7 и 8. в каретке 7 установлен настроечный винт 9, а в каретке 8 – измерительное сопло 10. каретки 7 и 8 подвешены на прямых плоских пружинах 11 и 12 к неподвижным кареткам 15 и 16. Накладки 17 служат для крепления плоских пружин 11 и 12. Цилиндрические пружины растяжения 13 и 14 создают измерительное усилие. Каретки 15 и 16 посредством кронштейна 18 крепятся на стойке 19.

Сжатый воздух поступает от компрессора под давлением $0,4 \div 0,6$ МПа на вход блока фильтра 20 и регулятора-стабилизатора давления 21. Стабилизатор 21 позволяет регулировать величину давления воздуха H в пределах $0,1 \div 0,2$ МПа. Манометр 22 показывает давление воздуха на входе пневматической измерительной системы. Через входные сопла 23 и 24 воздух поступает в измерительный сильфон 25 и сильфон противодавления 26. Из сильфона 26 воздух выходит в атмосферу через узел противодавления 27, а из сильфона 25 через измерительное сопло 10. В зависимости от диаметра контролируемой детали изменяется величина зазора z между торцом настроечного винта 9 и измерительным соплом 10 и давление воздуха $h_{из}$ в измерительном сильфоне 25. Разность давлений воздуха в измерительном сильфоне 25 и сильфоне противодавления 26 вызывает перемещение каретки 27, связывающей подвижные концы сильфонов, и замыкание или размыкание электрических контактов 28 и 31, 29 и 30. Регулируемые контакты 30 и 31 настраиваются с учётом положения верхней и нижней границ поля допуска размера контролируемой детали. Контакты 28-31

формируют дискретные электрические сигналы в случае выхода контролируемого размера за пределы поля допуска. Для визуального наблюдения за процессом измерения служит шкальное показывающее устройство 32.

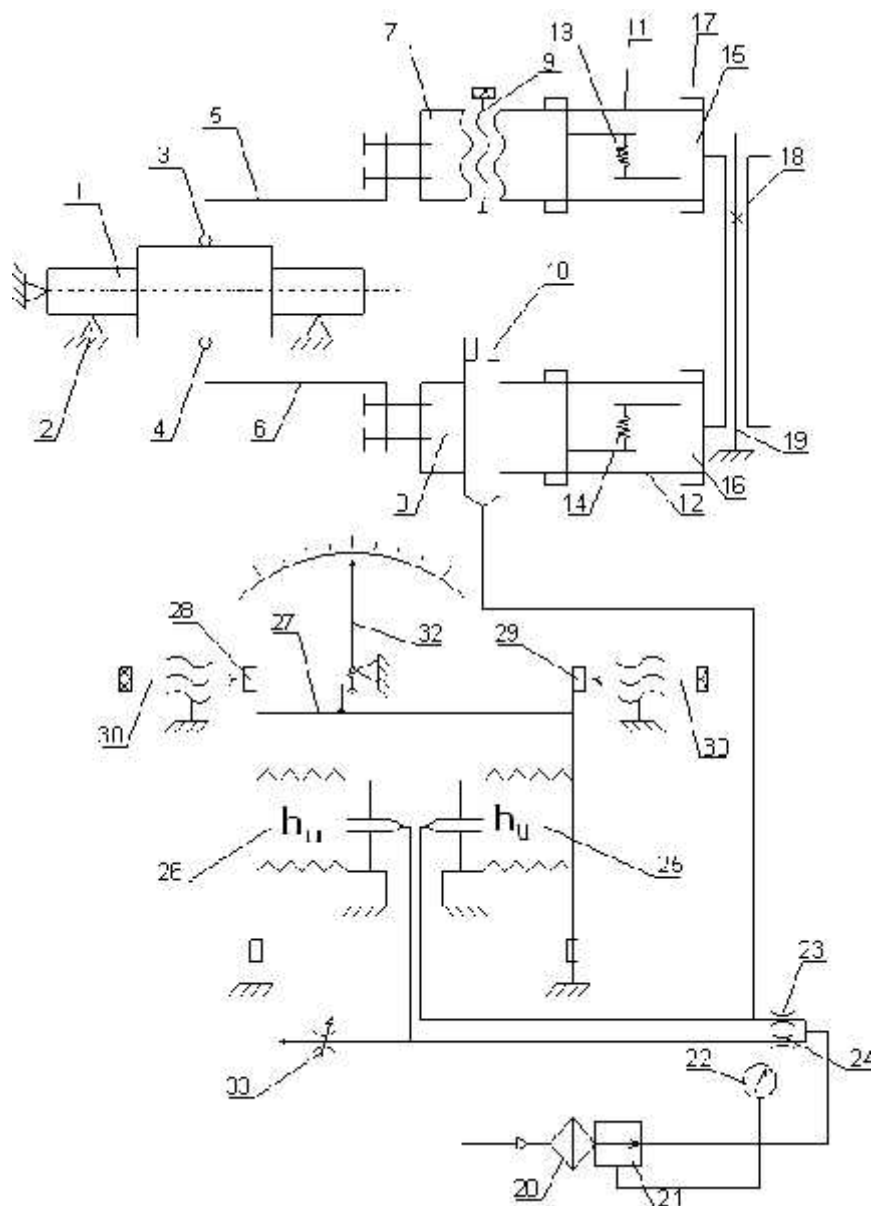


Рисунок 3.2 – Пневматическая схема измерительного устройства

3.3. Методика расчёта дифференциальных сильфонных пневмоэлектроконтактных преобразователей

3.3.1. Определение диапазона измерения

Пределы измерения пневматической измерительной системы Π_z определяются значениями минимального Z_{min} и максимального Z_{max} зазоров между торцом сопла и заслонкой на статической характеристике при заданной её нелинейности.

$$\Pi_z = Z_{\max} - Z_{\min} = \Delta Z \quad (3.5)$$

Пределы измерения должны удовлетворять величине допуска на контролируемый параметр и учитывать конструктивные особенности измерительной системы. Величина предела измерения вычисляется по формуле

$$\Pi_z = \Delta z = T(l + m) + \delta z \cdot n, \quad (3.6)$$

где T – допуск на контролируемый параметр;

m – коэффициент, учитывающий расширение предела измерения за границей поля допуска, $m = 0,2 \dots 0,6$;

$\delta z = 2 \dots 10$ мкм – погрешность установки зазора z , $\delta z = 2 \dots 10$ мкм;

n – число измерительных сопел.

3.3.2. Выбор параметров пневматической системы

Основными параметрами пневматической системы являются рабочее давление воздуха H ; диаметр измерительного сопла d_2 и входного d_1 ; пневматическое передаточное отношение K_z . Значения указанных параметров выбираются из табл. 3.1

Выбранные параметры свести в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры пневмосистемы

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение
1	Прямолинейный участок характеристики, мм	$\Delta z \dots$
2	Нелинейность характеристики, %	
3	Диаметр входного сопла, мм	$d_1 \dots$
4	Рабочее давление, МПа	$H \dots$
5	Пневматическое передаточное отношение, МПа/мкм	$K_z \dots$
6	Диаметр измерительного сопла, мм	$d_2 \dots$

3.3.3. Расчет параметров сильфонного преобразователя

Исходными параметрами для расчёта сильфонного преобразователя являются:

– общее измерения $[\Delta]$.

Общее передаточное отношение прибора определяется согласно выражению

$$K_{\Sigma} = K_z \cdot K_C \cdot K_M = \frac{I}{C}, \quad (3.7)$$

где K_C – передаточное отношение сильфона;

K_M – передаточное отношение механизма стрелки;

I – интервал деления шкалы (0,8... 1,5 мм);

C – цена деления шкалы.

Таблица 3.1 – Параметры пневматического преобразователя типа сопло-заслонка

Диаметр измерительного сопла d_2 , мм	Диаметр входного сопла d_1 , мм	Параметры			
		Рабочее давление H , МПа	Прямолинейный участок характеристики Δz , мм	Измерительный зазор в середине прямолинейного участка z_{cp} , мм	Пневматическое передаточное отношение K_z , 10^5 Па/мм
2,0	0,6	0,05	0,020	0,040	8,2
		0,1	0,024	0,042	13,9
		0,15	0,040	0,050	19,9
		0,2	0,044	0,052	21,0
	0,7	0,05	0,024	0,042	6,6
		0,1	0,044	0,052	10,1
		0,15	0,046	0,067	12,1
		0,2	0,050	0,070	15,1
	0,8	0,05	0,040	0,050	4,3
		0,1	0,046	0,073	7,0
		0,15	0,050	0,095	9,5
		0,2	0,060	0,090	11,6
	1,0	0,05	0,080	0,090	2,2
		0,1	0,080	0,120	4,3
		0,15	0,090	0,145	5,9
		0,2	0,100	0,150	7,4
2,0	1,2	0,05	0,080	0,120	1,5
		0,10	0,104	0,162	2,6
		0,15	0,110	0,215	3,8
		0,2	0,120	0,230	4,7
	1,5	0,05	0,100	0,215	0,7
		0,1	0,110	0,220	1,4
		0,15	0,130	0,245	2,0
		0,2	0,170	0,275	2,6

Передаточное отношение сильфона зависит от его эффективной площади $F_{\text{Э}}$ и коэффициента жесткости K :

$$K_C = \frac{F_{\text{Э}}}{K} = \frac{\Delta l}{\Delta h}, \quad (3.8)$$

где Δl – перемещение сильфона;

Δh – изменение давления воздуха;

$F_{\text{Э}}$ – эффективная площадь;

K – коэффициент жесткости двух сильфонов и их подвески (пружинного параллелограмма).

Произведение $K_Z \cdot K_C = 20 \dots 50$ представляет собой передачное отношение прибора на электрические контакты. С учетом последнего можно записать:

$$K_C = \frac{20 \dots 50}{K_Z} = \frac{F_{\text{Э}}}{K}. \quad (3.9)$$

Усилие, развиваемое сильфонами, должно обеспечивать необходимое усилие замыкания электрических контактов P_K и поворот стрелки P_M :

$$P_C \geq P_K + P_M, \quad (3.10)$$

где $P_K = n \cdot P + \sum k_i \cdot l_i$;

$P = 0,3 \text{ Н}$ – усилие предварительного прижима подвижного нерегулируемого электрического контакта;

n – число контактов;

l_i – величина перемещения i -го контакта;

$k_i = 20 \text{ Н/м}$ – коэффициент жесткости i -й пружины;

$P_M = (0,1 \dots 0,2) \text{ Н}$ – усилие поворота стрелки.

Расчет усилия, развиваемого сильфоном P_C , производить с учетом заданного числа контактов. Величина перемещения контакта $l_{i \max} = 5 \dots 7 \text{ мм}$.

Расчетные значения P_K и P_C занести в табл. 3.3.

Усилие, развиваемое сильфоном, должно удовлетворять погрешности прибора $[\Delta]_{\text{П}}$, величина которой может быть определена исходя из заданной суммарной погрешности измерения $[\Delta]$.

$$P_C = F_{\text{Э}} K_Z [\Delta]_{\text{П}}, \quad (3.11)$$

где $[\Delta]_{\text{П}} = (0,2 \dots 0,3)$.

Приравняв значения P_C согласно выражений (3.10) и (3.11), получим:

$$F_{\text{Э}} K_Z [\Delta]_{\text{П}} = P_K + P_M. \quad (3.12)$$

Откуда

$$F_{\Delta} = \frac{P_K + P_M}{K_Z [\Delta]_{\Pi}} . \quad (3.13)$$

Коэффициент жесткости сиффона и его пружинного подвеса определим из выражения (3.9)

$$K = \frac{F_{\Delta} K_Z}{20 \dots 50} . \quad (3.14)$$

Коэффициент жесткости подвески принимается равным

$$K_{\text{подвески}} = (0,1 \dots 0,2) K_C .$$

Передаточное отношение сиффона определим из выражения (3.8)

$$K_C = \frac{F_{\Delta \text{ табл}}}{K} . \quad (3.15)$$

Передаточное отношение механизма поворота стрелки будет равно

$$K_M = \frac{K_{\Sigma}}{K_Z \cdot K_C} . \quad (16)$$

Все рассчитанные значения занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Основные параметры сиффонного преобразователя

№	Наименование параметра	Обозначение
1	Усилие замыкания контактов, Н	P_K
2	Усилие, развиваемое сиффоном, Н	P_C
3	Эффективная площадь сиффона, м ²	F_{Δ}
4	Коэффициент жесткости сиффона и его подвеса, Н/м	K
5	Коэффициент жесткости подвеса, Н/м	K_{Π}
6	Передаточное отношение сиффона, м ³ /Н	K_C
7	Передаточное отношение механизма поворота стрелки	K_M

3.5. Расчет статической характеристики

Статическую характеристику измерительной системы с достаточной точностью можно описать следующей математической функцией:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2} \right)^2 z^2} , \quad (3.17)$$

Вычисленные значения измерительного давления h заносятся в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Расчетные значения

Зазор z , мкм	Давление воздуха h , МПа	Зазор z , мкм.	Давление воздуха h , МПа	Зазор z , мкм.	Давление воздуха h , МПа
0		45		90	
5		50		95	
10		55		100	
15		60		120	
20		65		140	
25		70		160	
30		75		180	
35		80		200	
40		85		–	–

По данным табл. 3.4 построить статическую характеристику и отметить на ней основные параметры (рис. 3.3).

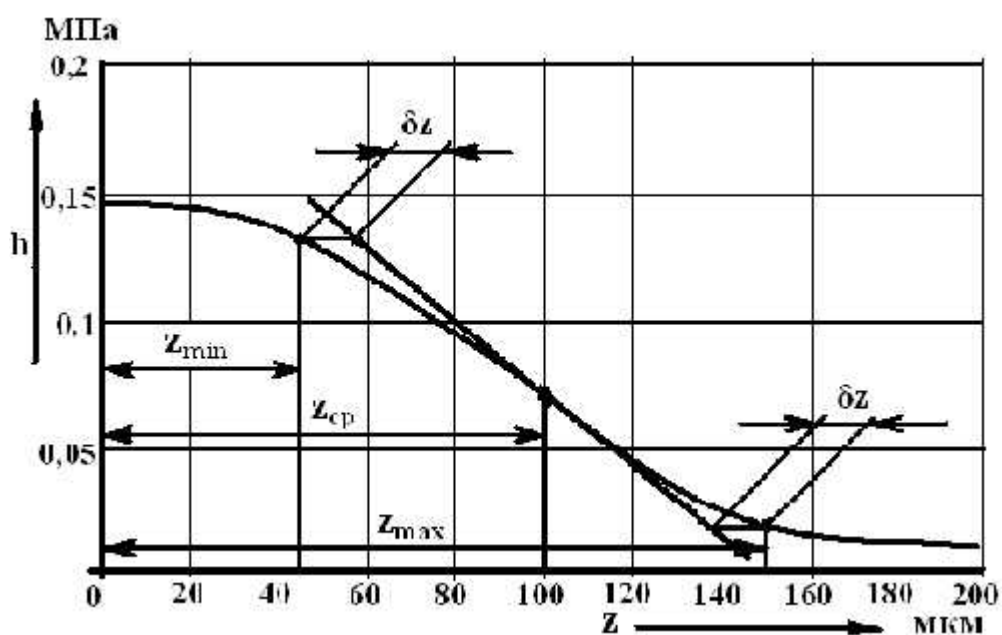


Рисунок 3.3 – Статическая характеристика пневматического преобразователя

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физические основы получения информации: Учебное пособие / Б.Ю. Каплан. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 286 с.: 60х90 1/16. – (Высшее образование: Бакалавриат). (переплет) ISBN 978-5-16-006381-2 – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/374641>.
2. Физические основы получения информации: Учебник / Раннев Г.Г., Су-рогина В.А., Тарасенко А.П. – М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 296 с.: 60х90 1/16. – (Бакалавриат) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-906818-39-3 – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/544727>.
3. Физические методы в медицине: Учебное пособие / Кожин А.А. – Рос-тов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2010. – 296 с. ISBN 978-5-9275-0760-3 – Ре-жим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/556229>.
4. Медицинская и биологическая физика: учеб. пособие / В.Г. Лещенко, Г.К. Ильич. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2017. – 552 с.: ил. – (Выс-шее образование). – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/766789>.
5. Системы и приборы для хирургии, реанимации и замещения функций органов – Новосиб.: НГТУ, 2010. – 278 с.: ISBN 978-5-7782-1395-1 – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/546209>
6. Системы и устройства в кардиологии/Алдонин Г.М., Желудько С.П. – Краснояр.: СФУ, 2014. – 181 с.: ISBN 978-5-7638-3003-3 – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/549877>.
7. Физические методы в медицине: Учебное пособие / Кожин А.А. - Рос-тов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2010. – 296 с. ISBN 978-5-9275-0760-3 – Ре-жим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/556229>.
8. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета [Электронный ресурс]: монография/ Джежора А.А.– Электрон. текстовые дан-ные.– Минск: Белорусская наука, 2007. – 351 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/10087>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Приборные системы и
автоматизация технологических процессов»

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

по дисциплине

Выполнил:

ст. гр. _____

Проверил:

Севастополь

20__ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Институт Политехнический
Кафедра Приборные системы и автоматизация технологических процессов
Направление подготовки/специальность _____

(код и название)

Профиль/специализация _____

Курс _____ Группа _____ Семестр _____

З А Д А Н И Е

НА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКУЮ РАБОТУ

студента _____

(фамилия, имя, отчество)

1. Тема работы _____

2. Сроки сдачи студентом законченной работы _____

3. Исходные данные к работе _____

4. Содержание разделов (перечень вопросов), подлежащих разработке

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

6. Дата выдачи задания _____

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(фамилия, инициалы)

(подпись)

Руководитель работы _____
(фамилия, инициалы, должность)

(ПОДПИСЬ)

« _____ » 20__ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Таблица В.1 – Варианты заданий для расчёта индуктивного преобразователя с Ш-образным сердечником

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Номер варианта									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Геометрические размеры магнитопровода	мм	$a=f=t=b$	3	4	5	6	2	4	3	5	7	6
			c	8	12	10	16	6	12	8	10	12	16
			h	12	20	25	30	20	10	15	20	25	10
2	Предел измерения	мм	$\Delta\delta$	0,1	0,2	0,3	0,25	0,15	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1
3	Измерительное усилие	Н	F	1	2	3	2	3	3	1	1	2	2
4	Передаточное отношение	Ом/мм	к	450	500	650	700	750	450	800	650	700	800
5	Частота питающего напряжения	Гц	f_0	50									

Таблица В.2 – Варианты заданий для расчёта индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Номер варианта									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Геометрические размеры магнитопровода	мм	d_1	3	4	5	5	4	3	2	4	5	6
			d_2	7	8	9	9	8	6	6	10	11	12
			d_3	22	24	28	28	26	20	18	30	35	28
			d_4	26	30	32	32	30	24	22	35	40	32
			h	25	20	20	35	20	15	20	25	30	35
			$t=f$	3	4	5	5	4	3	3	4	5	6
2	Предел измерения	мм	$\Delta\delta$	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,15	0,5	0,35	0,25	0,1
3	Измерительное усилие	Н	F	1	1,5	2,5	2	3	2,5	2	2,5	1	1,5
4	Передаточное отношение	Ом/мм	к	450	700	400	850	600	1000	900	480	800	650
5	Частота питающего напряжения	Гц	f_0	50									

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СИЛЬФОННОГО ПНЕВМОЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Задание: Разработать схему и провести расчет параметров пневматической измерительной системы для контроля наружного диаметра вала на базе дифференциального сильфонного пневмоэлектроконтактного преобразователя.

Таблица В.3 – Варианты заданий для расчёта дифференциального сильфонного пневмоэлектроконтактного преобразователя

№ п/п	Наименование параметра	Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	Допуск на контролируемый параметр, мкм	10	80	5	60	40	20	10	40	8	20
2	Допускаемая погрешность измерений, мкм	2	4	1	5	4	2	1	8	1	5
3	Число измерительных сопел	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
4	Нелинейность статической характеристики, %	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
5	Число электрических контактов	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2
6	Цена деления шкалы, мкм	0,5	2	0,5	2	2	1	1	1	0,5	1

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
к расчетно-графической работе по дисциплинам
«Физические основы получения информации»,
«Сенсорные элементы медицинских приборов»

Составители: **Васютенко** Александр Павлович,
Балакина Наталья Анатольевна

В авторской редакции

Изд. № 10/2021. Объем 3,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»