

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ

Учебно-методическое пособие

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ

Учебно-методическое пособие
к выполнению практических занятий по дисциплине
«Измерительные информационные и управляющие системы»
для студентов всех форм обучения технических направлений

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 681.521(075.8)

ББК 32.965-04я73

Р 248

Р е ц е н з е н т :

А. Ю. Тараховский – канд. техн. наук, доцент, заведующий
кафедрой «Основы цифрового проектирования»
Политехнического института СевГУ

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

Р248 Расчет параметров преобразователей и приборов: учебно-методическое пособие к выполнению практических занятий по дисциплине «Измерительные информационные и управляющие системы» для студентов всех форм обучения технических направлений / Севастопольский государственный университет; сост.: А. П. Васютенко, Н. А. Балакина, – Севастополь : СевГУ, 2024. – 79 с. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие предназначено для учебно-методического обеспечения дисциплины «Измерительные информационные и управляющие системы».

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам при выполнении практических работ по дисциплине «Измерительные информационные и управляющие системы».

В качестве лабораторных стендов представлены узлы и блоки измерительных преобразователей. Приведены схемы преобразователей измерительных устройств, методики и основные теоретические зависимости для расчета преобразователей, а также необходимые справочные данные.

Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия для студентов всех форм обучения технических направлений.

УДК 681.521(075.8)

ББК 32.965-04я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», протокол № 9 от 26 апреля 2024 г.

© Васютенко А. П., Балакина Н. А., сост., 2024

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДРОССЕЛЬНОГО ТИПА	6
1.1. Теоретические положения.....	6
1.2. Индивидуальные расчетные задания	29
1.3. Порядок выполнения работы	30
1.4. Содержание отчета.....	30
1.5. Контрольные вопросы	30
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛЕНОИДНОГО ТИПА	31
2.1. Теоретические положения.....	31
2.2. Индивидуальные расчетные задания	36
2.3. Порядок выполнения работы	37
2.4. Содержание отчета.....	38
2.5. Контрольные вопросы	38
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3. РАСЧЕТ СИЛЬФОННОГО ПНЕВМОЭЛЕКТРОКОНТАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	39
3.1. Теоретические положения.....	39
3.2. Индивидуальные расчетные задания	47
3.3. Порядок выполнения работы	47
3.4. Содержание отчета.....	47
3.5. Контрольные вопросы	48
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4. РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО- ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	49
4.1. Теоретические положения.....	49
4.2. Индивидуальные расчетные задания	54
4.3. Порядок выполнения работы	55
4.4. Содержание отчета.....	56
4.5. Контрольные вопросы	56
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5. РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА	57
5.1. Теоретические положения.....	57
5.2. Индивидуальные расчетные задания	61
5.3. Порядок выполнения работы	62

5.4. Содержание отчета.....	62
5.5. Контрольные вопросы	62
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6. РАСЧЕТ МЕМБРАННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА	63
6.1. Теоретические положения.....	63
6.2. Индивидуальные расчетные задания	66
6.3. Порядок выполнения работы	67
6.4. Содержание индивидуального отчета.....	67
6.5. Контрольные вопросы	68
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7. РАСЧЕТ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ЗАЗОРА	69
7.1. Теоретические положения.....	69
7.2. Индивидуальные расчетные задания	70
7.3. Порядок выполнения работы	70
7.4. Содержание индивидуального отчета.....	72
7.5. Контрольные вопросы	72
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8. РАСЧЕТ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ.....	73
8.1. Теоретические положения.....	73
8.2. Индивидуальные расчетные задания	75
8.3. Порядок выполнения работы	75
8.4. Содержание индивидуального отчета.....	75
8.5. Контрольные вопросы	77
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	78

ВВЕДЕНИЕ

Современное автоматизированное производство характеризуется тем, что в технологические процессы входят разнообразные по своему характеру технологические операции. Например, в автоматическую линию могут включаться станки для выполнения следующих операций: обработка резанием, пластическое деформирование, контроль.

Автоматические контрольные операции могут осуществляться как самостоятельно, так и совместно с процессами обработки, сборки и другими операциями. В связи с этим контрольно-измерительные операции и средства измерения можно классифицировать следующим образом:

- приборы активного контроля, осуществляющие измерение размеров деталей в процессе обработки, т.е. в процессе формообразования, и формирующие управляющие команды для станка;
- контрольно-сортировочные автоматы, предназначенные для обеспечения селективной сборки узлов в условиях крупносерийного и массового производств;
- подналадочные измерительные системы, формирующие по результатам контроля управляющие команды на поднастройку режущего инструмента с целью компенсации его износа, тепловых и силовых деформаций узлов станка;
- системы контроля и управления параметрами технологических процессов и операций, в том числе режимами резания;
- измерительные устройства контроля положения исполнительных органов и узлов автоматических линий.

Основным элементом измерительных устройств, приборов и систем является *первичный измерительный преобразователь*, воспринимающий значение измеряемой величины и преобразующий его в сигнал измерительной информации, удобный для дальнейшей обработки и хранения. На их базе создаются различные *датчики*, по существу являющиеся конструктивно обособленными *первичными преобразователями* и предназначенные для выработки сигналов информации.

В силу большого разнообразия измеряемых величин, требований к точности и диапазону измерения первичные преобразователи основываются на использовании различных физических явлений. Положенное в основу измерения явление материального мира называется *принципом измерения*.

В средствах автоматического контроля линейных величин широкое применение нашли индуктивные, пневматические, емкостные преобразователи, обладающие достаточным диапазоном и необходимой точностью измерения.

Учебно-методическое пособие написано для студентов технических направлений подготовки, образовательная программа которых включает в себя дисциплины и модули, формирующие компетенции в области проектирования и эксплуатации измерительной техники.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДРОССЕЛЬНОГО ТИПА

Цель: изучение принципов, методов и средств преобразования сигналов в индуктивных измерительных преобразователях; освоение методик выбора параметров индуктивных преобразователей для линейных измерений и расчета преобразователей с П-образным и Ш-образным сердечником и плоским якорем, а также преобразователей с цилиндрическим сердечником и плоским якорем.

1.1. Теоретические положения

1.1.1. Принцип действия и типы индуктивных преобразователей

Индуктивные приборы для линейных измерений в машиностроении 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 [1–5].

В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее 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):

$$Z = R + j\omega L, \quad (1)$$

где R — сопротивление катушки постоянному току, Ом; $j\omega L = j\omega \frac{W^2}{R_m}$ — индуктивное сопротивление, Ом; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота питающего напряжения (f — частота, Гц); W — количество витков катушки; R_m — сопротивление магнитной цепи катушки, 1/Гн.

Обычно один из элементов магнитной цепи (рис. 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.

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

$$Z = \varphi(\delta), \quad (2)$$

где δ — измеряемая линейная величина.

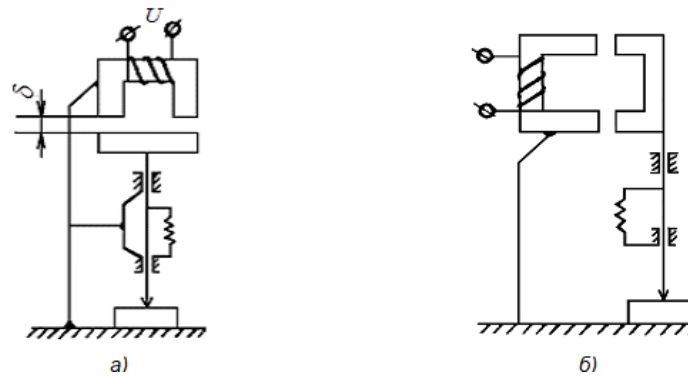


Рисунок 1 – Схемы индуктивных преобразователей дроссельного типа

Устройство, которое преобразует линейное перемещение в изменения электрического параметра Z с помощью описанной выше катушки, называется индуктивным преобразователем. Индуктивный прибор может быть представлен принципиальной схемой (рис. 2).

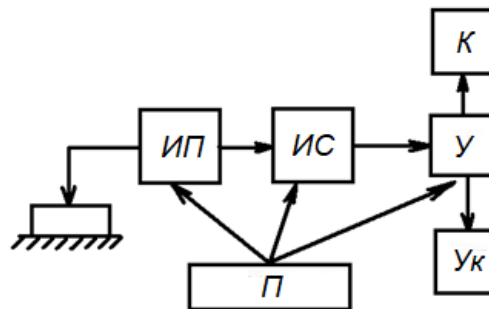


Рисунок 2 – Принципиальная схема индуктивного прибора

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 необходимость), *Ук* — указательное устройство, *К* — устройство для подачи команд, *П* — источник питания.

Общее передаточное отношение индуктивного прибора K_{Σ} будет равно

$$K_{\Sigma} = K_{ИП} \cdot K_{ИС} \cdot K_{У} \cdot K_{Ук}, \quad (3)$$

где $K_{ИП} = \frac{dZ}{d\delta}$ — передаточное отношение преобразователя; $K_{ИС} = \frac{dU_{вс}}{dZ}$ или

$K_{ИС} = \frac{dI_{вс}}{dZ}$ — передаточное отношение измерительной схемы; $U_{вс}$ и $I_{вс}$ —

напряжение и ток на выходе схемы; $K_{У} = \frac{dU}{dU_{вс}}$ — передаточное отношение

(коэффициент усиления) усилителя; U — выходное напряжение усилителя;

$K_{\text{ук}} = \frac{d\alpha}{dU}$ — передаточное отношение указывающего устройства; α — перемещение указателя.

Таким образом,

$$K_{\Sigma} = \frac{dZ}{d\delta} \cdot \frac{dU_{\text{вс}}}{dZ} \cdot \frac{dU}{dU_{\text{вс}}} \cdot \frac{d\alpha}{dU} = \frac{d\alpha}{d\delta}. \quad (4)$$

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

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 (см. рис. 1, а) или изменением площади зазора S (см. рис. 1, б). Характеристика преобразователя $Z = \varphi(\delta)$ (рис. 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 $K = \frac{dZ}{d\delta}$ постоянно.

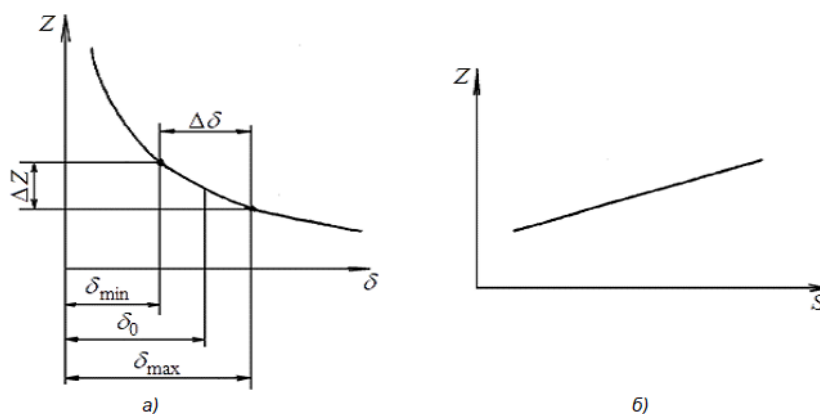


Рисунок 3 – Статические характеристики преобразователей

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

Преобразователи с переменным зазором позволяют получать высокие передаточные отношения.

С целью получения более линейной зависимости, не уменьшая величины $\Delta\delta$, применяют индуктивные преобразователи, принцип действия которых показан на рис. 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.

При соответствующем включении обеих катушек в измерительную схему (например, в соседние плечи мостовой схемы) дифференциальный преобразователь имеет примерно в 2 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.

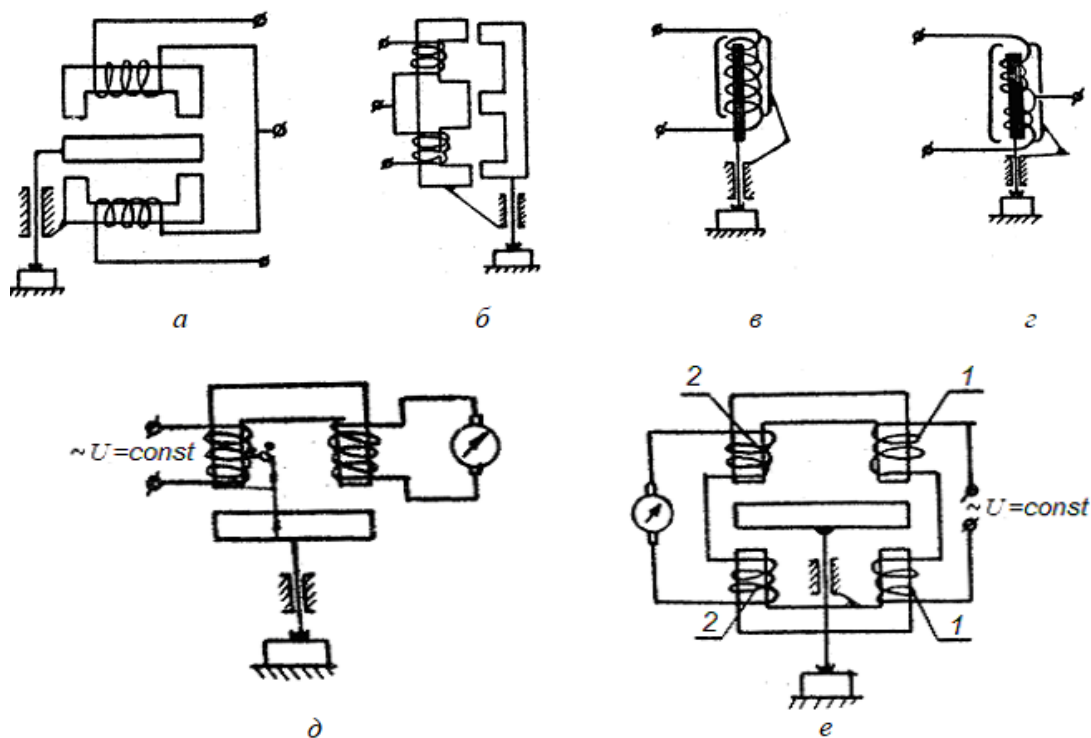


Рисунок 4 – Схемы электромагнитных преобразователей

Индуктивные преобразователи с переменной площадью воздушного зазора имеют линейную характеристику $Z = \varphi(S)$ (рис. 3, б), но невысокую чувствительность, используются для измерения больших перемещений. Дифференциальная схема данного типа преобразователя (рис. 4, б) обладает аналогичными преимуществами.

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

На рис. 4, в, г приведены схемы недифференциального и дифференциального 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 мере 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. 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 ЭДС.

Схема недифференциального трансформаторного преобразователя (см. рис. 4, д) малочувствительна.

Значительно лучшими свойствами обладает дифференциальный трансформаторный преобразователь (рис. 4, е, где 1 — первичные обмотки, 2 — вторичные обмотки).

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, пронизывающие вторичные катушки, будут неодинаковыми, и в измерителе появится ток, определяемый разностью индуцированных 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.

1.1.2. Методика расчета индуктивных преобразователей

Рассмотрим расчет индуктивного преобразователя, изображенного на рис. 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 $K_{инт} = \frac{dZ}{d\delta}$;
- ток и напряжение питания катушки преобразователя I и U ;
- число витков W , диаметр провода катушки $d_{пр}$;
- измерительное усилие преобразователя $F_{из}$;
- 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 находят все его параметры. В случае несоответствия полученного передаточного отношения или измерительного усилия заданному значению ищут пути их приближения, исходя из разработанной принципиальной схемы. В других случаях принимают решение о создании дополнительных усилительных устройств.

Расчет начинают с 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 листовая хромистый или молибденовый пермаллой или прессованные сердечники, из оксидов некоторых металлов — так называемые ферриты.

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

$$W = \frac{4 f_0 Q}{\pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (5)$$

где f_0 — коэффициент заполнения (выбирается по табл. 1) в зависимости от диаметра провода и марки изоляции; Q — площадь, занимаемая обмоткой катушки, мм²; $d_{\text{пр}}$ — диаметр провода катушки преобразователя, мм.

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

Таблица 1 – Коэффициент заполнения обмотки

Коэффициент заполнения	Марка провода		
	ПЭЛ, ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛШО
f_0	0,60	0,55	0,50

Сортамент эмалированных проводов приведен в табл. 2.

Таблица 2 – Сортамент эмалированных проводов

Диаметр провода по меди d_{np} , мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией d_u , 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
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

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \leq 0,15...0,2. \quad (6)$$

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 и малом зазоре δ_0 магнитный поток под средней частью полюса проводить практически 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 соблюдать условие

$$\frac{\delta_0}{a} > 0,1 \dots 0,2. \quad (7)$$

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 $B = 0,2 \dots 0,6$ Тл.

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

1. Определяют полное магнитное сопротивление магнитопровода R_{M_Σ} , которое включает сопротивления воздушных зазоров и стальной части магнитопровода.

2. По найденной величине R_{M_Σ} определяют полное электрическое сопротивление катушки преобразователя. Строят характеристику преобразователя $z = f(\delta)$, по которой определяют его чувствительность.

3. Определяют ток, необходимый для получения выбранной магнитной индукции.

4. Проверяют катушку на допустимую плотность тока. Рекомендуется, чтобы плотность тока $J \leq 2 \dots 2,5$ А/мм². Для малогабаритных преобразователей допускаемая плотность тока может быть повышена до $J \leq 4,5$ А/мм².

5. Определяют напряжение питания катушки.

6. По характеристике преобразователя $z = f(\delta)$, определяют его передаточное отношение $K_{\text{ип}} = \frac{\Delta Z}{\Delta \delta}$.

7. Определяют измерительное усилие преобразователя.

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

Расчет преобразователя с П-образным сердечником (см. рис. 4, а) является частным случаем расчета преобразователя с Ш-образным сердечником (рис. 5, а), поэтому будем рассматривать только последний.

Магнитная цепь (рис. 5, б) обычно выполняется симметричной относительно среднего сердечника, на котором расположена катушка (изображена жирными линиями). Поэтому достаточно рассчитать одну ее половину, уменьшив сечение среднего сердечника вдвое, и сохранить ту же величину намагничивающей силы катушки.

Суммарное магнитное сопротивление всей цепи:

$$R_{\Sigma} = \frac{R'_{M_{\Sigma}}}{2}. \quad (9)$$

Общий магнитный поток Φ_{Σ} , создаваемый катушкой преобразователя:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi_1, \quad (10)$$

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

5. 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 вычисляется по известным формулам, приведенным в табл. 3.

В нашем случае поле разбивается на восемь простых фигур (см. рис. 5, б).

Координаты поля выпучивания X' , X'' , Z'_a , Z''_a , Z'_b , Z''_b определяется по графику на рис. 7 и приведенным ниже рекомендациям.

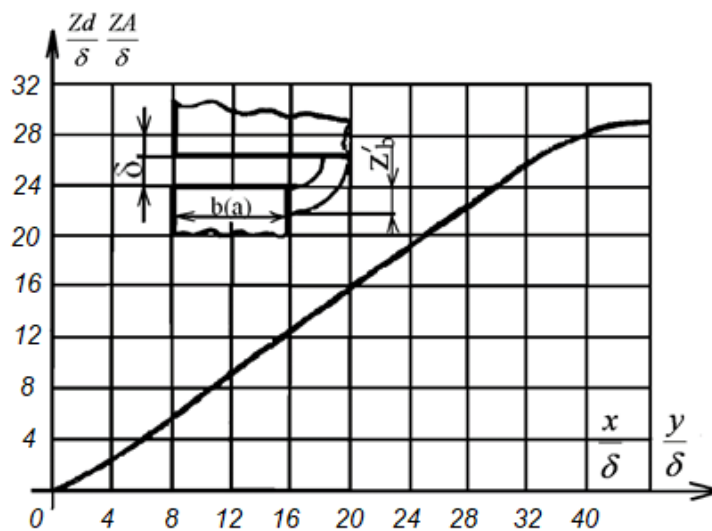


Рисунок 7 – Координаты поля выпучивания

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

Из рис. 7 по известной величине $\frac{X'}{\delta_{\max}}$ определяем $\frac{Z'_b}{\delta_{\max}}$. Расчет удобно

начинать с максимальной величины воздушного зазора $\delta_{\max} = \delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2}$, при которой ток проходящий через катушку преобразователя имеет наибольшее

значение.

Если при этих условиях определить параметры катушки, то плотность тока в процессе работы преобразователя не превысит расчетной величины.

С достаточной для практики точностью рекомендуется принимать

$$Z'_a = Z''_a = Z''_b = t.$$

По известной величине $\frac{Z''_b}{\delta_{max}}$ и по графику на рис. 7 определяем $\frac{X''}{\delta_{max}}$:

6. Определяем проводимости отдельных фигур по формулам табл. 3

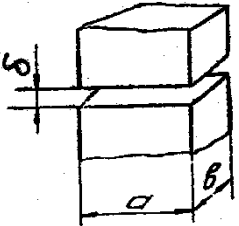
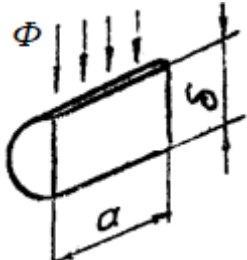
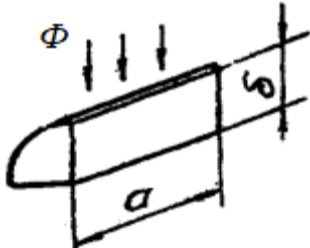
6.1. Проводимость половины полового цилиндра G (фигура 2 на рис. 5, б).

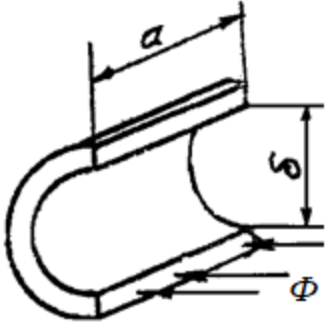
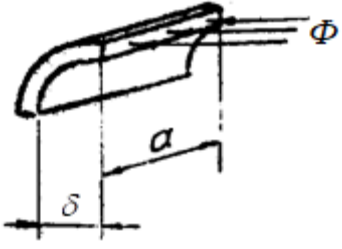
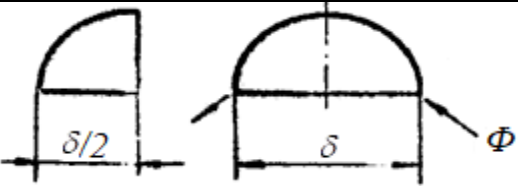
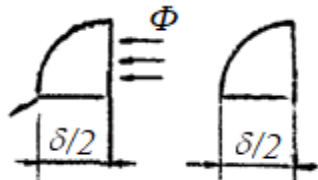
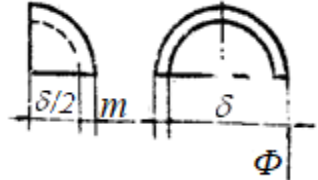
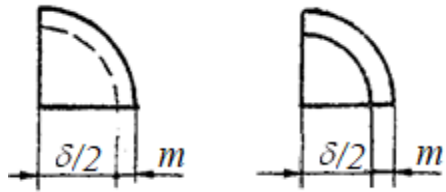
Таких фигур в зазоре δ_{II} — две, а в зазоре δ_{IV} — три,

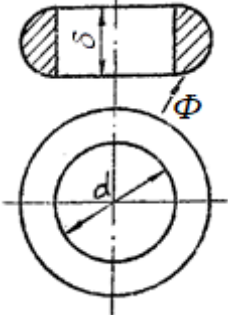
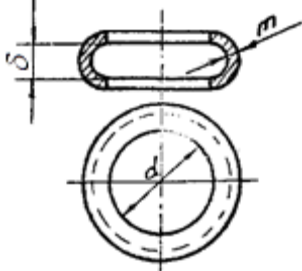
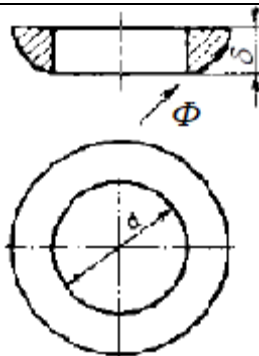
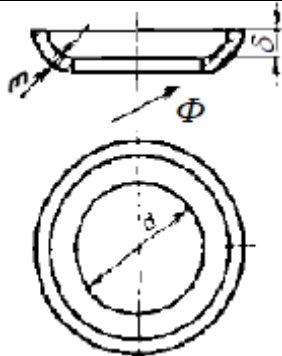
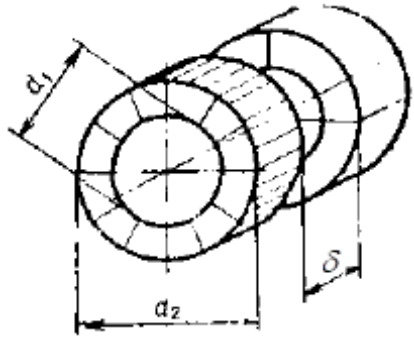
$$G = \mu_0 \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 1 \right)},$$

где m — средняя толщина стенки цилиндра.

Таблица 3 – Основные фигуры и аналитическое выражение их магнитных проводимостей

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
 Прямоугольный параллелепипед	$G = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$
 Полуцилиндр	$G = 0,26 \mu_0 a$
	$G = 0,52 \mu_0 a$

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
Четверть цилиндра  Половина полого цилиндра	$G = \mu_0 \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta}{m} + 1 \right)};$ $m = \frac{Z_b'' + (X'' + 0,5\delta)}{2}$
 Четверть полого цилиндра	$G = \mu_0 \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta}{m} + 0,5 \right)}$ $m = \frac{Z_b' + (X' - \delta)}{2}$
 Шаровой квадрант	$G = 0,077 \mu_0 \delta$
 Половина шарового квадранта	$G = 0,308 \mu_0 \delta$
 Квадрант полого шара	$G = \mu_0 \frac{m}{4};$ $m = \frac{Z_b' + (X'' - 0,5\delta)}{2}$
 Половина квадранта сферической оболочки	$G = \mu_0 \frac{m}{2};$ $m = \frac{Z_b' + (X'' - 0,5\delta)}{2}$

Эскиз фигуры	Формула магнитной проводимости
 Тело вращения (полуцилиндр)	$G = 0,26\pi\mu_0 d$
 Тело вращения (полукольцо)	$G = \mu_0 \frac{2d}{\frac{\delta}{m} + 1};$ $m = \frac{Z_b'' + (X'' - 0,5\delta)}{2}$
 Тело вращения (четверть цилиндра)	$G = 0,52\pi\mu_0 d$
 Тело вращения (четверть кольца)	$G = \mu_0 \frac{2d}{\frac{\delta}{m} + 0,5};$ $m = \frac{Z_b' + (X' - \delta)}{2}$
 Цилиндрическое кольцо	$G = \mu_0 \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4\delta}$

Среднюю толщину стенки цилиндра находим из выражения

$$m = \frac{Z_b'' + \left(X'' + \frac{\delta_{max}}{2} \right)}{2}.$$

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

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

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

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

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

$$G_4 = \mu_0 0,077 \delta_{max}.$$

6.5. Проводимость зазора под полюсами (фигура 5). По одной фигуре у каждого полюса:

$$G_5 = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta_{max}}.$$

6.6. Проводимость четверти цилиндра (фигура 6). По одной фигуре у каждого зазора:

$$G_6 = 0,52\mu_0 a.$$

6.7. Проводимость четверти полого цилиндра (фигура 7). По одной фигуре у каждого зазора:

$$G_7 = \mu_0 \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 0,5 \right)},$$

где $m = \frac{Z_b' + (X' - \delta_{max})}{2}.$

6.8. 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 δ_{IV} :

$$G_{\delta IV} = 3G_1 + 3G_2 + 2G_3 + 2G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + 2(2G_3 + 2G_4);$$

$$G_{\delta IV} = \mu_0 \left[\frac{6a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 1 \right)} + 1,3a + 1,5m + 0,46\delta_{max} + \frac{ab}{\delta_{max}} + \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 0,5 \right)} \right], \quad (11)$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Магнитное сопротивление зазора δ_{IV} :

$$R_{\delta IV} = \frac{1}{G_{\delta IV}}.$$

Для зазора δ_{II} :

$$\begin{aligned} G_{\delta II} &= 2G_1 + 2G_2 + G_5 + G_6 + G_7 + 2(2G_3 + 2G_4) = \\ &= \mu_0 \left[\frac{4a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 1 \right)} + 1,04a + \frac{a \cdot b}{\delta_{max}} + \frac{2a}{\pi \left(\frac{\delta_{max}}{m} + 0,5 \right)} + m + 0,308\delta_{max} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

Магнитное сопротивление зазора δ_{II} :

$$R_{\delta II} = \frac{1}{G_{\delta II}}.$$

7. Определение магнитного сопротивления сердечника.

Комплексное сопротивление отдельного участка сердечника определяется по формуле

$$\dot{z}_{mi} = (\rho_{Ri} + j\rho_{xi}) \frac{l_i}{S_i},$$

где ρ_{Ri}, ρ_{Xi} — удельное реактивное и активное магнитное сопротивление, определяемые по экспериментальным графикам (рис. 8) в зависимости от величины магнитной индукции B_i , м/Гн; l_i , S_i — средняя длина и поперечное сечение i -го сердечника.

Применение в индуктивных преобразователях сплошных магнитопроводов приводит к резкому проявлению поверхностного эффекта, при котором магнитное поле неравномерно распределяется по сечению, затухая по глубине сердечника. Поэтому для расчета подобных преобразователей необходимо пользоваться значениями удельных магнитных сопротивлений, определенными с учетом поверхностного эффекта, т.е. с учетом толщины сердечника.

Для шихтованных сердечников, выполненных из листовой электротехнической стали Э-12, Э-41, удельные сопротивления выбирают по экспериментальным кривым ρ_X и ρ_R , представленным на рис. 8.

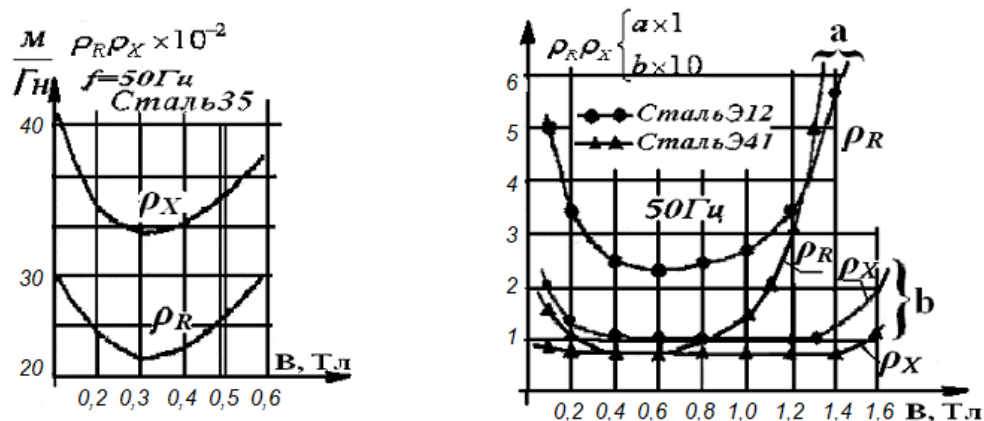


Рисунок 8 – Экспериментальные графики для определения ρ_{Ri}, ρ_{Xi}

Суммарное магнитное сопротивление половины сердечника будет равно сумме сопротивлений звеньев I-IV (см. рис. 5). Если поперечное сечение всех сердечников одинаково, то индукция в этих звеньях также будет одинаковой. В этом случае суммарное комплексное магнитное сопротивление одной половины сердечника

$$\dot{z}'_m = (\rho_R + j\rho_X) \frac{l_{I-IV}}{S},$$

где l_{I-IV} — суммарная длина всех участков сердечника.

Если же поперечные сечения отдельных участков сердечника не равны, предварительно находят индукцию B_i в каждом участке сердечника,

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i}.$$

По найденным значениям B_i определяют с помощью кривых рис. 8 соответствующие значения удельных сопротивлений ρ_X и ρ_R . Полное магнитное сопротивление сердечника будет равно сумме сопротивлений отдельных участков.

8. Суммарное магнитное сопротивление одной половины магнитной цепи преобразователя:

$$R'_{m\Sigma} = Z_{mI-IV} + R_{\delta II} + R_{\delta IV}. \quad (13)$$

Суммарное магнитное сопротивление всей цепи:

$$R_{m\Sigma} = \frac{R'_{m\Sigma}}{2}. \quad (14)$$

Модуль этого сопротивления:

$$R_{m\Sigma} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(R_{\delta II} + R_{\delta IV} + \Sigma \rho_{Ri} \frac{l_i}{S_i} \right)^2 + \left(\Sigma \rho_{Xi} \frac{l_i}{S_i} \right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Sigma R_m)^2 + (\Sigma X_m)^2},$$

где $\Sigma R_m = R_{\delta II} + R_{\delta IV} + \Sigma \rho_{Ri} \frac{l_i}{S_i}$, $\Sigma X_m = \Sigma \rho_{Xi} \frac{l_i}{S_i}$.

9. Полное комплексное электрическое сопротивление катушки преобразователя определяется из следующей формулы:

$$\dot{Z} = R_a + \frac{\omega W^2 \Sigma X_m}{R_{m\Sigma}^2} + j \frac{\omega W^2 \Sigma R_m}{R_{m\Sigma}^2}, \quad (15)$$

где R_a — активное (омическое) сопротивление катушки преобразователя, определяемое из выражения

$$R_a = \rho \frac{l_{cp}}{q} W, \quad (16)$$

здесь ρ — удельное сопротивление (для медной проволоки $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м); l_{cp} — средняя длина витка, м (рис. 9); q — поперечное сечение провода по меди (см. табл. 2); $\frac{\omega W^2 \Sigma X_m}{R_{m\Sigma}^2}$ — активное сопротивление преобразователя из-за потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, Ом; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, где f — частота, Гц; $j \frac{\omega W^2 \Sigma R_m}{R_{m\Sigma}^2}$ — реактивное индуктивное сопротивление катушки, Ом.

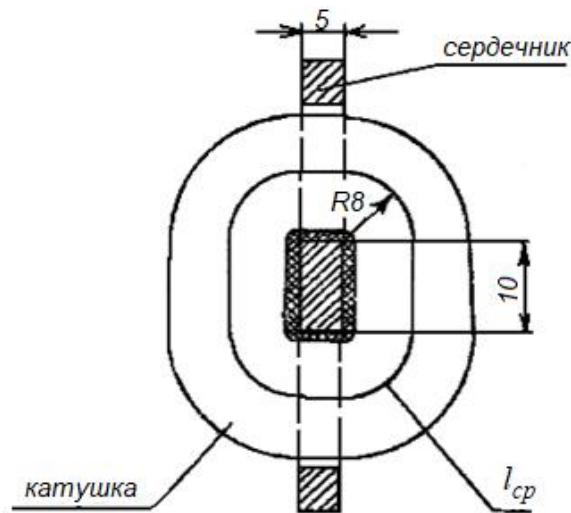


Рисунок 9 – Вид преобразователя с Ш-образным сердечником

Находим модуль электрического сопротивления катушки:

$$Z = \sqrt{\left(R_a + \frac{\omega W^2 \Sigma X_m}{R_{m\Sigma}^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega W^2 \Sigma R_m}{R_{m\Sigma}^2}\right)^2}.$$

10. Определяем параметры питания катушки преобразователя.

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

$$I = \frac{\Phi_\Sigma \cdot R_{m\Sigma}}{W \cdot \sqrt{2}},$$

где $\Phi_\Sigma = B \cdot S$ — магнитный поток в среднем сердечнике.

Плотность тока в обмотке

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

Напряжение питания катушки

$$U = Z \cdot I.$$

11. Определяем чувствительность преобразователя.

Для приближенного определения передаточного отношения преобразователя и определения измерительного усилия необходимо рассчитать полное сопротивление магнитной цепи и полное сопротивление катушки при наименьшем зазоре $\delta_{\min}$:

$$\delta_{\min} = \delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2}.$$

При выполнении повторного расчета при зазоре δ_{min} сопротивления стальных участков будем считать неизменными. Зная сопротивление катушки при двух значениях зазора δ_{max} и δ_{min} , получим ориентировочное значение чувствительности преобразователя

$$K_{ип} = \frac{\Delta Z}{\Delta \delta},$$

где ΔZ — разность сопротивлений катушки при δ_{max} и δ_{min} ; $\Delta \delta = \delta_{max} - \delta_{min}$ — диапазон измерения преобразователя.

12. Определяем измерительное усилие преобразователя.

Измерительное усилие $F_{из}$ преобразователя вычисляется исходя из величины максимальной электромеханической силы притяжения F_3 якоря к сердечнику, которая определяется по приближенной формуле, полученной из формулы Максвелла. Для недифференциального преобразователя сила притяжения одного полюса

$$F_3 = (IW)^2 \frac{\mu_0 G_{\delta i}}{\delta^2}. \quad (17)$$

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

$$F_{эд} = (IW)^2 \mu_0 \left[\frac{G_{\delta min}}{\left(\delta_0 - \frac{\Delta \delta}{2} \right)^2} - \frac{G_{\delta max}}{\left(\delta_0 + \frac{\Delta \delta}{2} \right)^2} \right] \quad (18)$$

Измерительное усилие $F_{из}$ преобразователя должно быть больше электромеханической силы притяжения якоря в 5...10 раз.

1.1.4. Порядок расчета индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником и плоским якорем

Принципиальная схема расчета преобразователя с цилиндрическим сердечником (см. рис. 10) такая же, как и у преобразователя с Ш-образным сердечником.

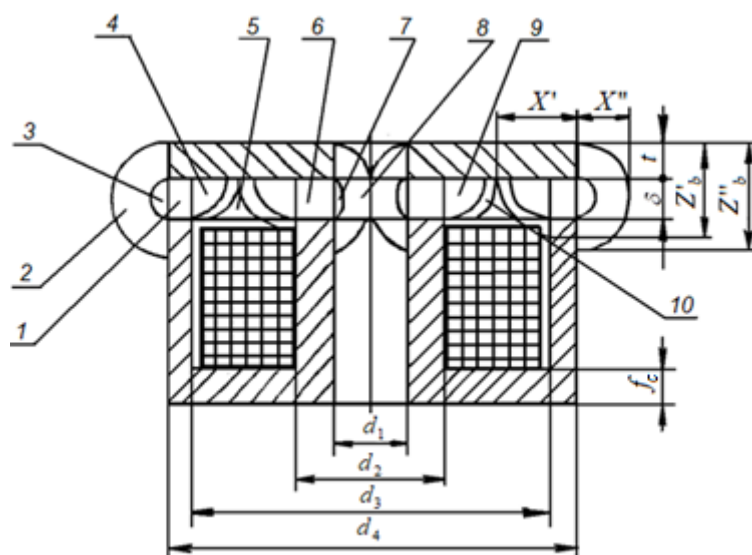


Рисунок 10 – Индуктивный преобразователь с цилиндрическим сердечником

Цилиндрический преобразователь имеет два кольцевых зазора. При определении проводимостей воздушных зазоров поле зазора разбивают на 10 простых геометрических фигур, проводимость которых определяем по формулам табл. 3. Координаты поля выпучивания магнитного потока находим по рис. 7.

1. Определяем начальный зазор согласно выражению (6):

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = 0,15 \dots 0,2.$$

2. Определяем количество витков W катушки согласно выражению (5).
3. Задаемся величиной индукции в среднем сердечнике.
4. Определяем координаты поля выпучивания:

$$X' = \frac{d_3 - d_2}{4}; \quad Z''_b. \quad (19)$$

По величине X' по графику (см. рис. 7) определяем Z'_b .

5. Определяем проводимость наружного зазора

$$G_{\delta I} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5,$$

и проводимость внутреннего зазора —

$$G_{\delta II} = G_6 + G_7 + G_8 + G_9 + G_{10}. \quad (20)$$

6. По формулам табл. 3 определяем проводимость отдельных фигур:

6.1. Проводимость цилиндрического кольца (фигура 1 на рис. 10)

$$G_1 = \mu_0 \frac{\pi(d_4^2 - d_3^2)}{4\delta_{max}}. \quad (21)$$

6.2. Проводимость тела вращения (полуцилиндр, фигура 2)

$$G_2 = \mu_0 \frac{2l_1}{\pi\left(\frac{\delta_{max}}{m} + 1\right)}, \quad (22)$$

где $l_1 = \pi d_4$, $m = \frac{Z_b'' + \left(X'' + \frac{\delta}{2}\right)}{2}$.

6.3. Проводимость тела вращения (полуцилиндр, фигура 3)

$$G_3 = 0,26\mu_0 \cdot l_1. \quad (23)$$

6.4. Проводимость тела вращения (четверть цилиндра, фигура 4):

$$G_4 = 0,52\mu_0 \cdot l_2, \quad (24)$$

где $l_2 = \pi d_3$.

6.5. Проводимость тела вращения (четверть кольца, фигура 5)

$$G_5 = \mu_0 \frac{2l_2}{\pi\left(\frac{\delta_{max}}{m} + 0,5\right)}, \quad (25)$$

где $m = \frac{Z_b' + (X' - \delta_{max})}{2}$.

6.6. Проводимость цилиндрического кольца (фигура 6)

$$G_6 = \mu_0 \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4\delta_{max}}. \quad (26)$$

6.7. Проводимость тела вращения (полуцилиндр, фигура 7)

$$G_7 = 0,26\mu_0 \cdot l_3, \quad (27)$$

где $l_3 = \pi d_1$.

6.8. Проводимость тела вращения (полукольцо; фигура 8)

$$G_8 = \mu_0 \frac{2l_3}{\left(\frac{\delta_{max}}{m} + 1\right)}. \quad (28)$$

где $l_3 = \pi d_1$, $m = \frac{Z_b'' + (X'' - 0,5\delta)}{2}$.

6.9. Проводимость тела вращения (четверть цилиндра; фигура 9)

$$G_9 = 0,52\mu_0 \cdot l_4, \quad (29)$$

где $l_4 = \pi d_2$.

6.10. Проводимость тела вращения (четверть кольца, фигура 10)

$$G_{10} = \mu_0 \frac{2l_4}{\left(\frac{\delta}{m} + 0,5\right)}, \quad (30)$$

где $m = \frac{Z_b' + (X' - \delta)}{2}$.

7. Вычисляем числовые значения в выражения для $R_{\delta I}$ и $R_{\delta II}$.

$$R_{\delta I} = \frac{1}{G_{\delta I}}; \quad R_{\delta II} = \frac{1}{G_{\delta II}}.$$

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

$$R_{\Sigma M} = R_{\delta I} + R_{\delta II}.$$

8. Определяем полное комплексное электрическое сопротивление катушки по формуле (15)

$$\dot{Z} = R_a + \frac{\omega W^2 \Sigma X_M}{R_{M\Sigma}^2} + j \frac{\omega W^2 \Sigma R_M}{R_{M\Sigma}^2},$$

где $R_a = \rho \frac{l_{cp}}{q} W$.

9. Модуль электрического сопротивления

$$Z = \sqrt{\left(R_a + \frac{\omega W^2 \Sigma X_M}{R_{M\Sigma}^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega W^2 \Sigma R_M}{R_{M\Sigma}^2}\right)^2}.$$

10. Определяем параметры питания катушки преобразователя.

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

$$I = \frac{\Phi_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma}}{W \cdot \sqrt{2}},$$

где $\Phi_{\Sigma} = B \cdot S$, Вб; B — индукция в среднем сердечнике (внутреннем полюсе);

$S = \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4}$ — площадь внутреннего полюса (см. рис. 10).

Плотность тока в обмотке

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

Напряжение питания катушки

$$U = Z \cdot I.$$

11. Определяем чувствительность преобразователя.

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

$$\delta_{\min} = \delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2};$$

Передаточное отношение вычисляется из выражения

$$K_{\text{ип}} \approx \frac{\Delta Z}{\Delta\delta}.$$

12. Определяем измерительное усилие преобразователя.

Измерительное усилие (считая преобразователь дифференциальным)

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

где $F_{\text{эд}} = F'_{\text{эд}} + F''_{\text{эд}}$; $F'_{\text{эд}}$ — равнодействующая электромеханических сил наружных полюсов, Н; $F''_{\text{эд}}$ — равнодействующая электромеханических сил внутренних полюсов, Н, определяемые из выражений

$$F'_{эд} = (IW)^2 \mu_0 G'_\delta \left[\frac{1}{\left(\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2} \right)^2} - \frac{1}{\left(\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2} \right)^2} \right];$$

$$F''_{эд} = (IW)^2 \mu_0 G''_\delta \left[\frac{1}{\left(\delta_0 - \frac{\Delta\delta}{2} \right)^2} - \frac{1}{\left(\delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2} \right)^2} \right],$$

где G'_δ , G''_δ — проводимости соответственно наружных и внутренних полюсов.

1.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета индуктивного преобразователя приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4 – Варианты заданий для расчета индуктивного преобразователя с Ш-образным сердечником

№	Наименование параметра	Обозначение	Значение									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Геометрические размеры магнитопровода, мм	$a = f_c = t = b$	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	$F_{из}$	1	2	3	2	3	3	1	1	2	2
4	Передаточное отношение, Ом/мм	$K_{ип}$	450	500	650	700	750	450	800	650	700	800
5	Частота питающего напряжения, Гц	f	50									

Таблица 5 – Варианты заданий для расчета индуктивного преобразователя с цилиндрическим сердечником

№	Наименование параметра	Обозначение	Значение									
			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
		$t = f_c$	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

№	Наименование параметра	Обозначение	Значение									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	Измерительное усилие, Н	$F_{из}$	1	1,5	2,5	2	3	2,5	2	2,5	1	1,5
4	Передаточное отношение, Ом/мм	$K_{ип}$	450	700	400	850	600	1000	900	480	800	650
5	Частота питающего напряжения, Гц	f	50									

1.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретические положения.
2. Выполните эскиз магнитопровода преобразователя (см. рис. 5 или рис. 10).
3. Проведите расчеты параметров заданной схемы преобразователя.

1.4. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Схема индуктивного преобразователя.
5. Расчет заданных параметров.
6. Выводы.

1.5. Контрольные вопросы

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?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛЕНОИДНОГО ТИПА

Цель: изучение конструкции и методики расчета индуктивного преобразователя соленоидного типа.

2.1. Теоретические положения

2.1.1. Принцип действия и конструкция

Для измерения линейных перемещений в диапазоне от 0 до 10...20 мм применяются индуктивные преобразователи с разомкнутой магнитной цепью, так называемые преобразователи соленоидного типа [1–6].

На рис. 11 приведены схемы недифференциального (см. рис. 11, *а*) и дифференциального (см. рис. 11, *б*) преобразователя соленоидного типа.

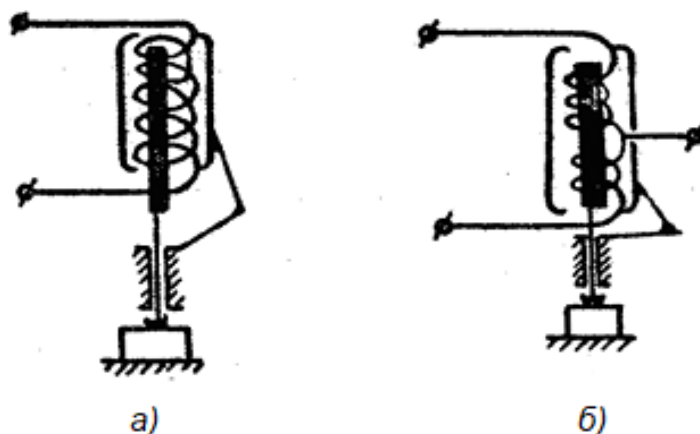


Рисунок 11 – Схемы индуктивных преобразователей

Преобразователь представляет собой катушку, внутри которой помещен ферромагнитный сердечник. При перемещении сердечника внутри катушки изменяется ее индуктивность L , при изменении которой меняется выходное напряжение или ток:

$$L = \frac{W^2}{R_M}, \quad (31)$$

где W — число витков катушки; R_M — сопротивление магнитопровода.

Конструкция широкопредельного индуктивного преобразователя показана на рис. 12.

Преобразователь (см. рис. 12) собран в цилиндрическом корпусе с наружным диаметром 28 мм. Измерительный стержень 8 преобразователя установлен на шариковой направляющей 7. На одном конце стержня установлен измерительный наконечник 9, оснащенный синтетическим алмазом; на другом его конце — ферритовый трубчатый сердечник 1. На стержне 8 закреплены два шарикоподшипника 6, предохраняющие его от поворота.

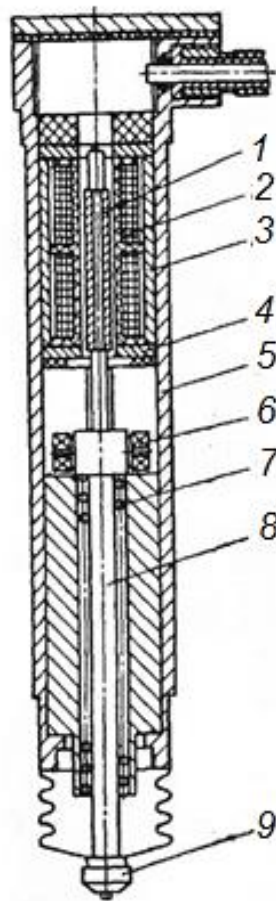


Рисунок 12 – Конструкция индуктивного преобразователя соленоидного типа

Перемещение трубчатого сердечника преобразователя вызывает изменение сопротивления двухсекционной катушки 2, магнитопровод которой состоит из ферритовых шайб 4 и экранирующей втулки 3 из магнитомягкой стали. Выводы проводов выполнены экранированным кабелем. Преобразователь надежно герметизирован.

2.1.2. Исходные данные для расчета:

Необходимы следующие данные:

- требуемая относительная чувствительность преобразователя δS , мм^{-1} ;
- сопротивление катушки Z , Ом;
- частота питающего напряжения f , Гц;
- допускаемая погрешность от нелинейности характеристики ΔI_n , мкм;
- заданный диапазон измерения D , мм.

Конструктивные размеры магнитопровода преобразователя показаны на рис. 13.

На рис. 13 приняты следующие обозначения:

- длина катушки l_k , мм;
- длина сердечника $l_c = 1,1l_k$, мм;
- радиус катушки R , мм;
- радиус сердечника r , мм.

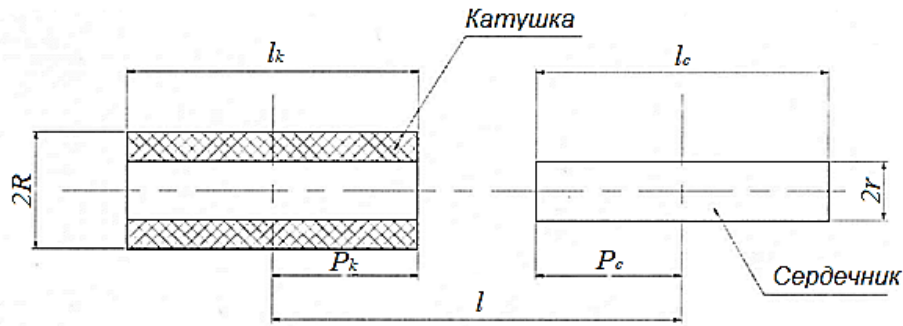


Рисунок 13 – Конструктивные размеры магнитопровода

Добротность катушки Q_k преобразователя характеризует величину потерь энергии в ней на перемагничивание и вихревые потоки и определяются из выражения

$$Q_k = \frac{fL}{R_{\text{полн}}}, \quad (32)$$

где $R_{\text{полн}} = R_{\text{пр}} + R_{\Sigma}$ — полное сопротивление катушки преобразователя; $R_{\text{пр}}$ —

сопротивление провода катушки; $R_{\Sigma} = \frac{2P}{I_{\text{max}}^2} = \frac{A}{(R_{\text{мс}} + R_{\text{мз}})^2}$ — сопротивление в

схеме замещения индуктивного преобразователя (рис. 14), на котором должна расходоваться мощность P , равная мощности потерь в сердечнике;

$A = \frac{2(\sigma_{\text{п}} + \sigma_{\text{в}})Gfw^2}{S^2}$ — постоянная величина для конкретного преобразователя,

не зависящая от величины зазора; $R_{\text{мс}}$ — магнитное сопротивление сердечника;

$R_{\text{мз}}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора; $\sigma_{\text{п}}$ — коэффициент потерь

на перемагничивание; $\sigma_{\text{в}}$ — коэффициент потерь на вихревые токи.

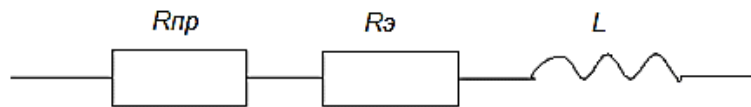


Рисунок 14 – Схема замещения индуктивного преобразователя

2.1.3. Методика расчета

1. Определение относительной максимальной чувствительности.

Относительная чувствительность δS определяется как отношение

$$\delta S = \frac{S}{L}, \quad (33)$$

где S — абсолютная чувствительность, Гн/м:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta},$$

где ΔL — изменение индуктивности катушки, Гн; D — диапазон измерений, м.
Значение максимальной чувствительности определяется по формуле

$$\Delta S_{\max} = \frac{\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{2P_c + P_k}\right)^2}} - \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{P_k}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{2P_c - P_k}\right)^2}}}{\sqrt{(2P_c + P_k)^2 + R^2} - \sqrt{(2P_c - P_k)^2 + R^2}}, \quad (34)$$

где $P_c = l_c / 2$; $P_k = l_k / 2$.

Поскольку преобразователь дифференциальный, $\delta S_{\max}$ равна

$$\delta S_{\max \text{ диф}} = 2\delta S_{\max}. \quad (35)$$

Должно выполняться условие

$$\delta S_{\max \text{ диф}} \geq \delta S_{\tau}.$$

2. Определение требуемой индуктивности преобразователя:

$$L = \frac{Z}{2\pi f \sqrt{\frac{1}{Q^2} + 1}}. \quad (36)$$

3. Расчет числа витков W катушки:

$$W = \sqrt{\frac{8LP_c P_k}{\pi r^2 \mu_0 (\mu_c - 1) \left(\sqrt{(2P_c + P_k)^2 + R^2} - \sqrt{(2P_c - P_k)^2 + R^2} \right)}}, \quad (37)$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная; $\mu_c = 44$ — относительная магнитная проницаемость.

4. Расчет на вместимость количества витков проволоки заданного диаметра $d_{\text{пр}}$ в принятые габариты катушки:

$$W' = \frac{4Kl_k (R - r)}{\pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (38)$$

где $K = 0,7 \dots 0,9$ — коэффициент заполнения катушки; $d_{\text{пр}}$ — диаметр провода.

Если расчетное число витков не помещается в заданные габаритные размеры катушки, т.е. $W' < W$, то можно увеличить частоту питающего напряжения f , а затем пересчитать требуемую индуктивность L по формуле (36)

и найти новое число витков W катушки (см. выражение (37)).

5. Определение индуктивности катушки в среднем положении сердечника:

$$L_m = \frac{A}{R} \left(\sqrt{(2P_c + P_k)^2 + R^2} - \sqrt{(2P_c - P_k)^2 + R^2} \right), \quad (39)$$

где $A = \frac{\pi r^2}{8} \mu_0 (\mu_c - 1) \frac{W^2 R}{P_c P_k}$.

6. Статическая характеристика преобразователя.

Зависимость индуктивности L от параметра m имеет вид

$$L = A \cdot \left(\sqrt{(m + P_1)^2 + 1} - \sqrt{(m - P_1)^2 + 1} + \sqrt{(m + P_2)^2 + 1} - \sqrt{(m - P_2)^2 + 1} \right), \quad (40)$$

где $l = 1, 1l_c$ — перемещение сердечника;

$$m = \frac{l}{R}; \quad P_1 = \frac{P_c + P_k}{R}; \quad P_2 = \frac{P_c - P_k}{R}.$$

Выражение (40) с учетом $m = \frac{l}{R}$ можно переписать в виде

$$L = A \left[\sqrt{\left(\frac{l}{R} + P_1 \right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{l}{R} - P_1 \right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{l}{R} + P_2 \right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{l}{R} - P_2 \right)^2 + 1} \right]. \quad (41)$$

Для нахождения точек построения статической характеристики как зависимости $L = f(l)$ необходимо задаться рядом значений l от 0 до $1, 1l_c$ с шагом 0,5 или 1 мм.

7. Определение максимальной абсолютной чувствительности преобразователя:

$$S_{max} = \delta S_{max \text{ диф}} L_{max}. \quad (42)$$

Значение $\delta S_{max \text{ диф}}$ и L_m определены в п. 1 и 5. Полученное значение S_{max} рассчитывается в зависимости от перемещения сердечника l .

8. Определение чувствительности $S_{max(m)}$ в функции от параметра $m = \frac{l}{R}$:

$$S_{max(m)} = S_{max} / \frac{dm}{dl} = S_{max} R. \quad (43)$$

9. Уравнение линеаризирующей прямой для функции $L = f(m)$ имеет вид

$$L' = S_{\max(m)} \left(m - \frac{p_c}{R} \right) + L_m. \quad (44)$$

Задаваясь рядом значений m получим точки, через которые проведем линеаризирующую прямую.

10. Определение погрешности измерения от нелинейности статической характеристики:

$$\Delta l_{\text{н.расч}} = \frac{1}{S_{\max(m)}} (L_m - L') \leq \Delta l_{\text{н}}. \quad (45)$$

После подстановки L' согласно (44) в формулу (45) имеем

$$\Delta l_{\text{н.расч}} = \frac{1}{S_{\max(m)}} \left[2L_m - S_{\max(m)} \left(m - \frac{p_c}{R} \right) \right] \leq \Delta l_{\text{н}}. \quad (46)$$

2.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета индуктивного преобразователя даны в табл. 6 и выбираются по последней цифре номера зачетной книжки.

Таблица 6 – Исходные данные

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Требуемая относительная чувствительность δS_T , мм	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2
Сопротивление катушки Z , Ом	1000									
Частота питающего напряжения f , Гц	2000									
Допускаемая погрешность от нелинейности статической характеристики $\Delta l_{\text{н}}$, мкм	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1
Диаметр провода $d_{\text{пр}}$, мм	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12	0,08
Диапазон измерения D , мм	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5
Длина катушки l_k , мм	15	10	8	15	10	8	15	10	8	15
Радиус катушки R , мм	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5
Радиус сердечника r , мм	3,0									
Добротность катушки Q_k	8	4	10	8	4	10	8	4	10	8

2.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретические положения.
2. Выполните эскиз магнитопровода преобразователя (см. рис. 13) с указанием заданных (см. табл. 6) геометрических размеров.
3. Рассчитайте относительную максимальную чувствительность дифференциального преобразователя $\delta S_{\text{махдиф}}$ и проверьте выполнение условия $\delta S_{\text{махдиф}} \geq \delta S_{\text{Т}}$.
4. Рассчитайте требуемую индуктивность по формуле (36). Число витков катушки W по формуле (37). Проверьте их на вместимость в габаритные размеры катушки (см. формулу (38)).
5. Определите индуктивность катушки L_m по формуле (39).
6. Рассчитайте значения индуктивности L при перемещении сердечника l от 0 до $1,1l_c$ мм с дискретностью 1 мм. Данные расчета занесите в табл. 7.

Таблица 7 – Расчетные данные

Наименование параметра	Перемещение сердечника l , мм								
	0	1	2	3	4	5	6	...	...
Параметр $m = l / R$									
Индуктивность L , Гн									
Погрешность от нелинейности $\Delta l_{\text{н.расч}}$, мм									

7. Рассчитайте абсолютную максимальную чувствительность преобразователя $S_{\text{мах}}$ и $S_{\text{мах}(m)}$.
8. Рассчитайте погрешность от нелинейности статической характеристики $\Delta l_{\text{н.расч}}$ при перемещении сердечника l от 0 до $1,1l_c$ мм. Расчетные значения m и $\Delta l_{\text{н.расч}}$ занесите в табл. 7.
9. Постройте статическую характеристику преобразователя $L = f(l)$ и зависимость погрешности от нелинейности статической характеристики $\Delta l_{\text{н.расч}}$ при перемещении сердечника l от 0 до $1,1l_c$ мм (рис. 15).

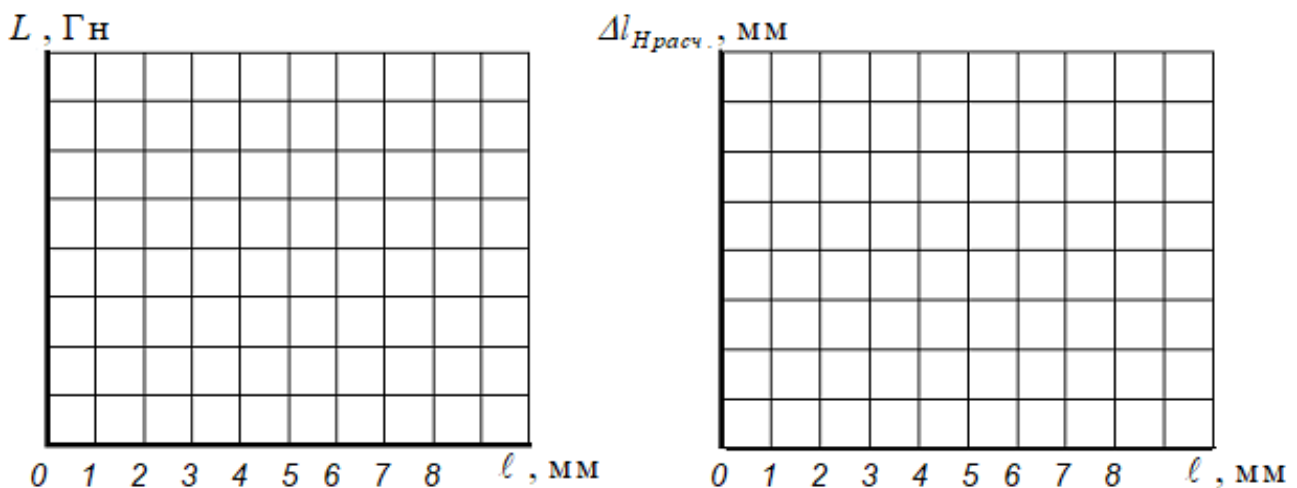


Рисунок 15 – Графические зависимости:

a — статическая характеристика преобразователя $L = f(l)$; b — зависимость погрешности от нелинейности статической характеристики $\Delta l_{\text{н.расч}} = f(l)$

10. Проверьте соответствие расчетной величины погрешности $\Delta l_{\text{н.расч}}$ допускаемой $\Delta l_{\text{н}}$ в заданном диапазоне измерений Д.

2.4. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Эскиз магнитопровода преобразователя.
5. Расчет параметров $\delta S_{\text{max диф}}$, W , L_m , L , S_{max} , $S_{\text{max}(m)}$, $\Delta l_{\text{н.расч}}$.
6. Таблица 7 с расчетными данными.
7. Графики зависимости $L = f(l)$ и $\Delta l_{\text{н.расч}} = f(l)$.
8. Выводы.

2.5. Контрольные вопросы

1. За счет чего повышаются точность и чувствительность индуктивного преобразователя дифференциального типа?
2. Что такое индуктивность и добротность катушки?
3. Конструкция индуктивного преобразователя?
4. Как рассчитать относительную чувствительность преобразователя?
5. Как определить погрешность измерения от нелинейности характеристики преобразователя?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3. РАСЧЕТ СИЛЬФОННОГО ПНЕВМОЭЛЕКТРОКОНТАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель: изучение принципов, методов и средств преобразования сигналов в пневматических измерительных приборах; освоение методик выбора параметров пневматических преобразующих устройств и расчета дифференциальных сильфонных пневмоэлектродатчиков для линейных измерений в приборостроении.

3.1. Теоретические положения

3.1.1. 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 [1, 2, 7]. На рис. 16 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, что приводит к изменению давления воздуха h , регистрируемого показывающим прибором 4.

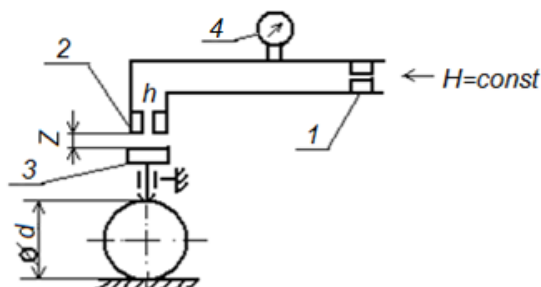


Рисунок 16 – Схема контактного пневматического преобразователя

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

$$G_1 = F_1 \alpha_1 \varepsilon_1 \sqrt{2\rho_1} \sqrt{H - h}, \quad (47)$$

$$G_2 = F_2 \alpha_2 \varepsilon_2 \sqrt{2\rho_2} \sqrt{H}, \quad (48)$$

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; ε_1 , ε_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:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \approx 1; \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \approx 1; \rho_1 \approx \rho_2.$$

Таким образом,

$$\alpha_1 F_1 \sqrt{H - h} = \alpha_2 F_2 \sqrt{h}, \quad (49)$$

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^2 \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2}\right)^2 Z^2}, \quad (50)$$

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. 17 показана пневматическая схема измерительного устройства для контроля диаметра вала.

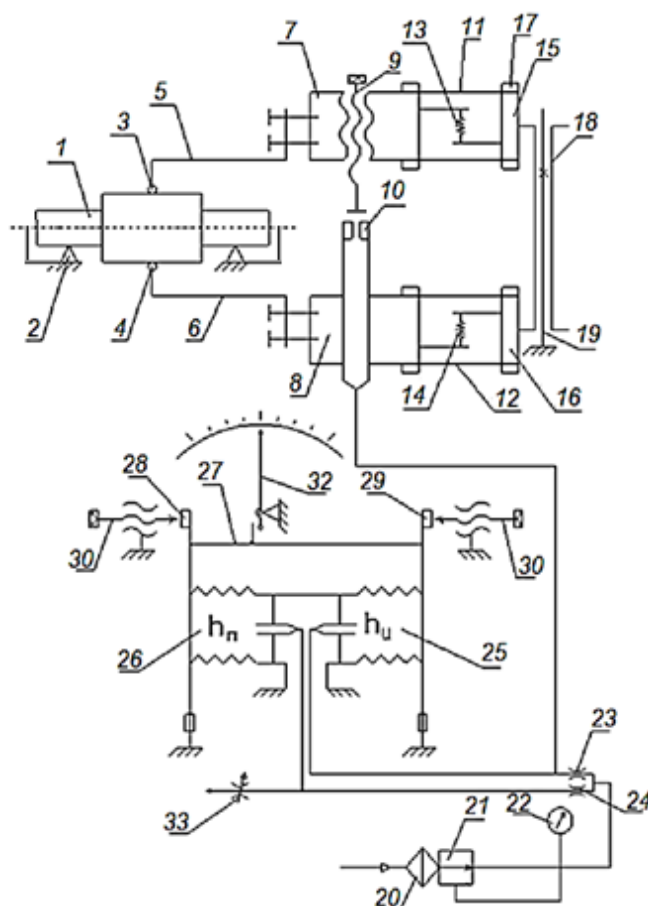


Рисунок 17 – Пневматическая схема измерительного устройства

Контролируемый вал 1 перемещается по направляющим 2 и проходит между измерительными наконечниками 3 и 4. Наконечники установлены в губках 5 и 6, закрепленных 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...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...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_n 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 учетом положения верхней и нижней границ интервала допуска размера контролируемой детали. Контакты 28–31 формируют дискретные электрические сигналы в случае выхода контролируемого размера за пределы интервала допуска. Для визуального наблюдения за процессом измерения служит шкальное показывающее устройство 32.

3.1.2. 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 прямолинейном участке статической характеристики при заданной ее нелинейности (рис. 18):

$$\Pi_Z = Z_{max} - Z_{min} = \Delta Z . \quad (51)$$

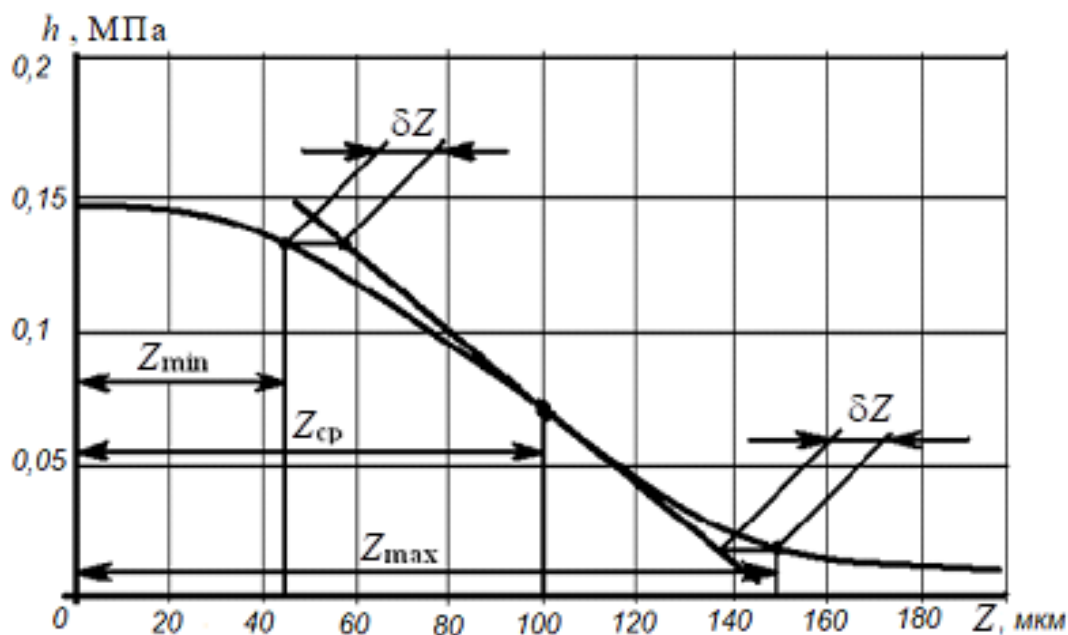


Рисунок 18 – Статическая характеристика пневматического преобразователя

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

$$\Pi_Z = \Delta Z = T(1 + m) + \delta Z \cdot n, \quad (52)$$

где T — допуск на контролируемый параметр; m — коэффициент, учитывающий расширение предела измерения за границей интервала допуска, $m = 0,2 \dots 0,6$; $\delta Z = 2 \dots 10$ мкм — погрешность установки зазора Z ; n — число измерительных сопел.

3.1.3. Выбор параметров пневматической системы

Основными параметрами пневматической системы являются рабочее давление воздуха H ; диаметр измерительного d_2 и входного d_1 сопел; пневматическое передаточное отношение K_Z . Значения указанных параметров выбирают из табл. 8 по величине расчетного значения предела измерения Π_Z . Выбранные параметры необходимо свести в табл. 9.

Таблица 8 – 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 (P_Z), мм	Измерительный зазор в середине прямолинейного участка Z_{cp} , мм	Пневматическое передаточное отношение K_Z , МПа/мм
2,0	0,6	0,05	0,020	0,040	0,72
		0,1	0,024	0,042	1,25
		0,15	0,040	0,050	1,67
		0,2	0,044	0,052	1,93
	0,7	0,05	0,024	0,042	0,56
		0,1	0,044	0,052	0,8
		0,15	0,046	0,067	1,12
		0,2	0,050	0,070	1,42
	0,8	0,05	0,040	0,050	0,34
		0,1	0,046	0,073	0,62
		0,15	0,050	0,095	0,82
		0,2	0,060	0,090	1,02
	1,0	0,05	0,080	0,090	0,19
		0,1	0,080	0,120	0,38
		0,15	0,090	0,145	0,44
		0,2	0,100	0,150	0,60
2,0	1,2	0,05	0,080	0,120	0,13
		0,10	0,104	0,162	0,26
		0,15	0,110	0,215	0,34
		0,2	0,120	0,230	0,42
	1,5	0,05	0,100	0,215	0,7
		0,1	0,110	0,220	0,14
		0,15	0,130	0,245	0,20
		0,2	0,170	0,275	0,25

Таблица 9 – Параметры пневмосистемы

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

3.1.4. Расчет параметров сильфонного преобразователя

Исходными параметрами для расчета сильфонного преобразователя являются:

- общее передаточное отношение прибора $K_{\text{общ}}$,
- передаточное отношение пневматического преобразователя K_z ;
- допускаемая погрешность измерения $[\Delta]$.

Общее передаточное отношение прибора определяется согласно выражению

$$K_{\text{общ}} = K_z \cdot K_c \cdot K_m = \frac{I}{Ц}, \quad (53)$$

где K_c — передаточное отношение сильфона; K_m — передаточное отношение механизма стрелки; I — интервал деления шкалы (0,8...1,5 мм); $Ц = 0,0005...0,002$ мм — цена деления шкалы.

Передаточное отношение сильфона зависит от его эффективной площади F_3 и коэффициента жесткости K :

$$K_c = \frac{F_3}{k} = \frac{\Delta l}{\Delta h}, \quad (54)$$

где Δl — перемещение сильфона; Δh — изменение давления воздуха; F_3 — эффективная площадь; k — коэффициент жесткости двух сильфонов и их подвески (пружинного параллелограмма).

Произведение $K_z \cdot K_c = 20...50$ представляет собой передаточное отношение прибора на электрические контакты. С учетом последнего можно записать:

$$K_c = \frac{20...50}{K_z} = \frac{F_3}{k}. \quad (55)$$

Усилие, развиваемое сильфонами, должно обеспечивать необходимое усилие замыкания электрических контактов P_k и поворот стрелки P_m :

$$P_c \geq P_k + P_m, \quad (56)$$

где $P_k = n_k \cdot P + \sum k_i \cdot l_i$; здесь $P = 0,3$ Н — усилие предварительного прижима подвижного нерегулируемого электрического контакта; n_k — число контактов; l_i — величина перемещения i -го контакта; k_i — коэффициент жесткости i -ой пружины, $k_i = 20$ Н/м; P_m — усилие поворота стрелки, $P_m = (0,1 \dots 0,2)$ Н.

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

Расчетные значения P_k и P_c занесите в табл. 10.

Таблица 10 – Основные параметры сильфонного преобразователя

№	Наименование параметра	Обозначение	Значение
1	Усилие замыкания контактов, Н	P_k	
2	Усилие, развиваемое сильфоном, Н	P_c	
3	Эффективная площадь сильфона, м ²	F_3	
4	Коэффициент жесткости двух сильфонов и их подвески, Н/м	k	
5	Коэффициент жесткости подвески, Н/м	k_{Π}	
6	Передаточное отношение сильфона, м ³ /Н	K_c	
7	Передаточное отношение механизма поворота стрелки	K_m	

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

$$P_c = F_3 K_Z [\Delta]_{\Pi}, \quad (57)$$

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

Приравняв значения P_c согласно выражениям (56) и (57), получим:

$$F_3 K_Z [\Delta]_{\Pi} = P_k + P_m, \quad (58)$$

откуда

$$F_3 = \frac{P_k + P_m}{K_Z [\Delta]_{\Pi}}. \quad (59)$$

Коэффициент жесткости сильфона и его пружинного подвеса определим из выражения (55):

$$k = \frac{F_{\text{э}} K_Z}{20 \dots 50}. \quad (60)$$

Коэффициент жесткости подвески $k_{\text{п}}$ принимается равным 10...20% от общей жесткости подвижной системы k .

Передаточное отношение сильфона определим из выражения (54):

$$K_c = \frac{F_{\text{э табл}}}{k}. \quad (61)$$

Передаточное отношение механизма поворота стрелки:

$$K_m = \frac{K_{\Sigma}}{K_Z K_c}. \quad (62)$$

Все рассчитанные значения занесите в табл. 10.

3.1.5. Расчет статической характеристики

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

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2} \right)^2 Z^2}. \quad (63)$$

Вычисленные значения измерительного давления h заносятся в табл. 11.

Таблица 11 – 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. 11 постройте статическую характеристику и отметьте на ней основные параметры (рис. 18).

3.2. Индивидуальные расчетные задания

Разработайте схему и проведите расчет параметров пневматической измерительной системы для контроля наружного диаметра вала на базе дифференциального сильфонного пневмоэлектроконтактного преобразователя.

Исходные данные представлены в табл. 12.

Номер варианта выбирается по последней цифре зачетной книжки.

Таблица 12 – Исходные данные

№	Наименование параметра	Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	Допуск на контролируемый параметр T , мкм	10	80	5	60	40	20	10	40	8	20
2	Допускаемая погрешность измерений $[\Delta]$, мкм	2	4	1	5	4	2	1	8	1	5
3	Число измерительных сопел n	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 n_k	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2
6	Цена деления шкалы C , мкм	0,5	2	0,5	2	2	1	1	1	0,5	1

3.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретические положения.
2. Исходные данные возьмите из табл. 12.
3. Проведите расчет параметров сильфонного преобразователя.
4. Заполните таблицу расчетных данных (см. табл. 11).
5. Постройте статическую характеристику пневматического преобразователя.

3.4. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Пневматическая схема измерительного устройства для контроля диаметра вала.
5. Таблица расчетных данных.
6. Схема и расчет параметров пневматической измерительной системы для контроля наружного диаметра вала.
7. Статическая характеристика пневматического преобразователя.
8. Выводы.

3.5. Контрольные вопросы

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?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4.

РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель: изучение схем измерения отклонения формы цилиндрических деталей в поперечном сечении, радиального и торцового биений и методики расчёта амплитудно-частотной характеристики пневматического преобразователя.

4.1. Теоретические положения

4.1.1. Динамика пневматических преобразователей

Форма цилиндрических деталей в поперечном сечении, радиальное и торцовое биение поверхностей оказывают существенное влияние на характер сопряжения, кинематическую точность, надёжность и долговечность работы механизмов [1, 2, 8–10].

Радиальное и торцовое биения являются комплексными параметрами, учитывающими отклонение как формы поверхности, так и взаимного расположения. Измерение отклонения формы детали в поперечном сечении (отклонение от круглости), радиального и торцового биений производится в процессе вращения контролируемой детали (рис. 19).

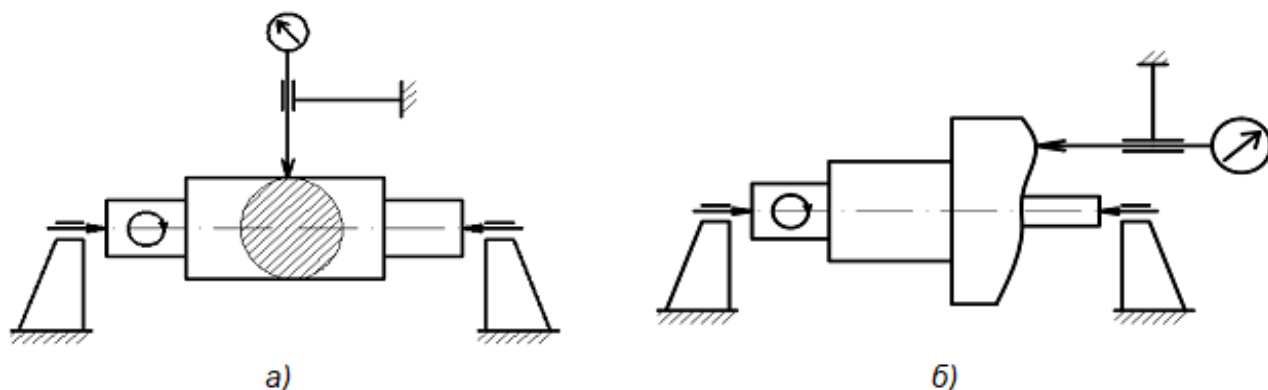


Рисунок 19 – Схемы измерения биения:
а — радиальное биение; б — торцовое биение

Скорость вращения детали n_d в процессе измерения ограничивается двумя условиями:

- $n_{d\max}$ — ограничивается динамическими характеристиками преобразователя (инерционностью);
- $n_{d\min}$ — заданной производительностью контроля.

Пневматический принцип измерения широко используется для измерения геометрических параметров деталей, так как первичные преобразователи имеют малые габаритные размеры и позволяют осуществлять бесконтактные измерения.

Недостатком пневматических измерительных преобразователей является их инерционность, которая характеризуется двумя параметрами: временем

срабатывания t_c и амплитудной частотной характеристикой $A(n)$.

Под *временем срабатывания* t_c понимается интервал времени, необходимый для стабилизации давления и расхода воздуха в приборе, а также положения чувствительного элемента и указателя прибора, после того как измерительное сопло или измерительный наконечник и измеряемая деталь заняли взаимное положение, соответствующее измерению.

Амплитудно-частотная характеристика представляет собой зависимость амплитуды колебаний чувствительного элемента и указателя прибора от частоты изменения синусоидально изменяющегося размера.

Экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик пневматических преобразователей позволили предложить эмпирическое уравнение, с достаточной точностью (1...2%), описывающее действительный ход амплитудно-частотных характеристик в диапазоне частот от 0 до 300 пер/мин:

$$A(n) = \frac{A_{дин}}{A_{ст}} = \frac{1}{1 + a_{100} \left(n \frac{V}{100} \right)^{3/2}}, \quad (64)$$

где $A_{дин}$ и $A_{ст}$ — соответственно динамическая и статическая амплитуды колебаний, выраженные в одних и тех же единицах (рис. 20); $n = n_d \cdot k$ — число периодов в минуту синусоидального изменяющегося размера, пер/мин; n_d — скорость вращения детали, об/мин; k — коэффициент, учитывающий вид погрешности формы поперечного сечения детали ($k=2$ — эллипс; $k=3$ — трехгранка); V — объем измерительной камеры, см³; a_{100} — коэффициент, зависящий от параметров пневматической измерительной системы (табл. 13).

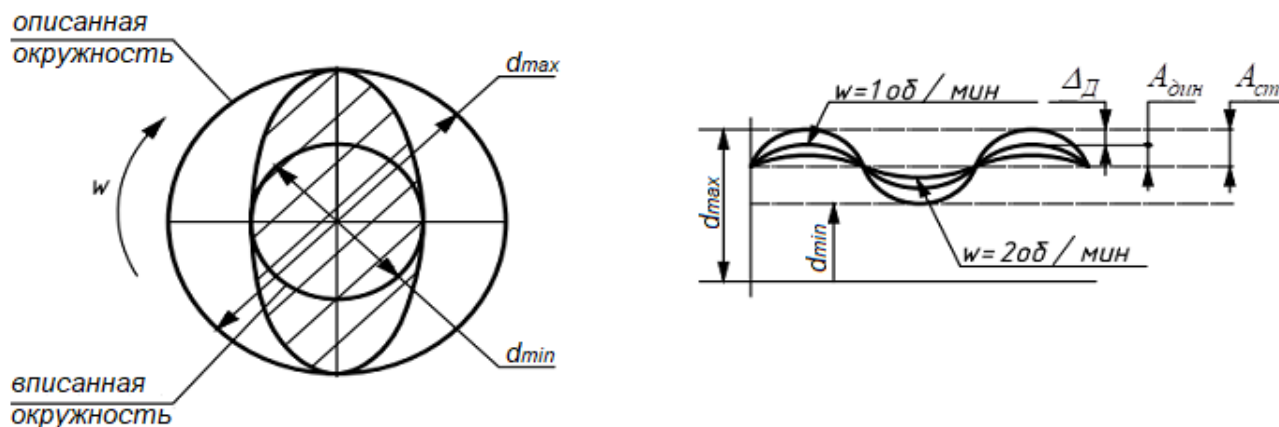


Рисунок 20 – Схема образования динамической погрешности

Таблица 13 – Значение коэффициента a_{100}

Диаметр входного сопла d_1 , мм	Давление питания H , 10^5 Па	$a_{100} \cdot 10^5$
0,7	0,5	393
	1,0	551
	1,5	618
	2,0	686
0,8	0,5	212
	1,0	376
	1,5	442
	2,0	502
1,0	0,5	133
	1,0	195
	1,5	258
	2,0	320
1,2	0,5	67
	1,0	108
	1,5	131
	2,0	151
1,5	0,5	39
	1,0	53
	1,5	64
	2,0	75

Вследствие инерционности пневматического преобразователя измеренное значение амплитуды $A_{дин}$, характеризующее отклонение формы детали в поперечном сечении, меньше действительного значения $A_{ст}$. Чем больше скорость вращения измеряемой детали, тем меньше $A_{дин}$, а соответственно и $A_{дин} / A_{ст}$, и больше динамическая погрешность измерения Δ_D :

$$\Delta_D = A_{ст} - A_{дин}. \quad (65)$$

При выборе параметров пневматической измерительной системы с заданным периодом цикла T работы не следует стремиться к большой величине $A_{дин} / A_{ст}$ за счет увеличения диаметра отверстия входного сопла, так как это приводит к снижению пневматического передаточного отношения K_Z и уменьшению величины $A_{дин}$ несмотря на большую величину $A_{дин} / A_{ст}$. Рекомендуется выбирать параметры пневматической системы d_1 и H таким образом, чтобы произведение $K_Z \frac{A_{дин}}{A_{ст}}$ было максимальным. Практика показывает, что при этом отношение $A_{дин} / A_{ст}$ получается не менее 0,6...0,7.

4.1.2. Методика выбора параметров пневматической измерительной системы и расчета амплитудно-частотной характеристики

1. Исходные данные.

Исходными данными являются допуск T на контролируемый параметр (отклонение формы поперечного сечения) и производительность контроля:

$$Q = \frac{1}{t_u}, \quad (66)$$

где t_u — время измерения.

2. Расчет погрешности измерения.

Допускаемая величина погрешности измерения отклонения формы $[A_\phi]$ рассчитывается исходя из допуска T на контролируемый параметр:

$$[A_\phi] = (0,1 \dots 0,3) \cdot T. \quad (67)$$

Динамическая погрешность измерения является составляющей суммарной погрешности измерения, предельное допускаемое ее значение $[A_d]$ может быть выражено в долях от допускаемой погрешности $[A_\phi]$

$$[A_d] = (0,2 \dots 0,3) [A_\phi]. \quad (68)$$

3. Выбор параметров пневмосистемы.

Измерительное сопло выбирается диаметром $d_2 = 2$ мм. Этот диаметр является наиболее применяемым вследствие лучшей технологичности с точки зрения трудоемкости и точности изготовления и обеспечивает малые габаритные размеры измерительной оснастки.

Рабочее давление воздуха $H = 0,1 \dots 0,2$ МПа обеспечивается серийно выпускаемыми стабилизаторами при работе от сети сжатого воздуха с давлением $0,4 \dots 0,6$ МПа.

Диаметр входного сопла d_1 пневмосистемы должен удовлетворять двум условиям:

- 1) весь предел измерения Π_Z должен располагаться в области прямолинейного участка характеристики $h = f(Z)$;
- 2) время срабатывания пневмосистемы, а также ее амплитудно-частотная характеристика должны обеспечивать заданную производительность измерения.

Величина требуемого прямолинейного участка Π_Z статической характеристики $h = f(Z)$ вычисляется по формуле

$$\Pi_Z = z_{\max} - z_{\min} = \Delta z = T(\ell + m) + \delta z \cdot n, \quad (69)$$

где T — допуск на контролируемый параметр; $m = 0,2 \dots 0,6$ — коэффициент, учитывающий расширение предела измерения за границей интервала допуска; $\delta z = 2 \dots 10$ — погрешность установки зазора Z , мкм; n — число измерительных сопел.

По рассчитанной величине $\Pi_{Z \text{ расч}}$ из табл. 8 выбирают варианты значений параметров d_1 , H и K_Z , удовлетворяющих условию $\Pi_{Z \text{ табл}} \geq \Pi_{Z \text{ расч}}$.

4. Расчет объема измерительной камеры.

Объем измерительной камеры V равен:

$$V = V_C + V_{III}, \quad (70)$$

где V_C — объем измерительной камеры сильфонного преобразователя, $V_C = 21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; V_{III} — объем внутренних каналов соединительных шлангов, определяемый из выражения

$$V_{III} = \frac{\pi d_{III}^2}{4} \ell_{III},$$

где d_{III} — внутренний диаметр соединительного шланга, $d_{III} = 4,0 \dots 4,5$ мм; ℓ_{III} — длина соединительных шлангов, $\ell_{III} = 0,8 \dots 1,0$ м.

5. Расчет амплитудно-частотной характеристики.

Число периодов в минуту n синусоидально изменяющегося размера детали в поперечном сечении определяется скоростью вращения детали n_D и числом измерительных сопел k , параллельно включенных в измерительную ветвь. При измерении овальности одним измерительным соплом (рис. 21, а) $k=1$; двумя соплами — $k=2$ (рис. 21, б); при измерении огранки тремя соплами — $k=3$ (рис. 21, в).

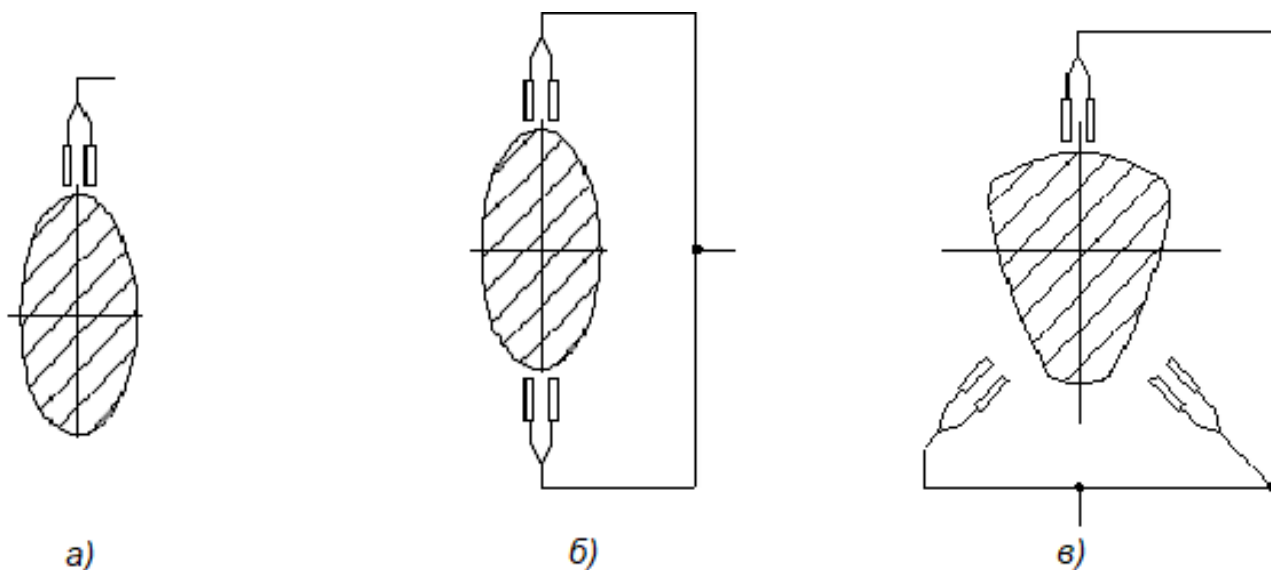


Рисунок 21 – Схемы измерения отклонения формы

Число периодов в минуту n изменяющегося размера:

$$n = k \cdot n_D = \frac{k \cdot 60}{t_u}, \quad (71)$$

где $n_D = \frac{60}{t_u}$ – скорость вращения детали n_D , мин⁻¹, t_u — время измерения, с.

Амплитудно-частотные характеристики рассчитываются согласно выражению (64) для выбранных по табл. 14 параметров d_{1i} и H_i и рассчитанных параметров V и n .

6. Определение амплитудно-частотных характеристик пневмосистемы и динамической погрешности измерения.

Оптимизация параметров пневмосистемы осуществляется путем нахождения максимального значения произведения

$$\left[K_{zi} \left(\frac{A_{дин}}{A_{см}} \right) i \right]_{max}.$$

Динамическая погрешность пневмосистемы рассчитывается по формуле

$$\Delta_D = A_{см} - A_{дин} = A_{см} [1 - A(n)] \leq [\Delta_D], \quad (72)$$

где $A(n) = A_{дин} / A_{см}$ — значение амплитудно-частотной характеристики, соответствующее $\left[K_{zi} \left(\frac{A_{дин}}{A_{см}} \right) i \right]_{max}$; $A_{см} = a_\phi$; $a_\phi = \frac{d_{max} - d_{min}}{2}$ — погрешность формы детали в поперечном сечении; $[\Delta_D]$ — допускаемая динамическая погрешность измерения.

4.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета амплитудно-частотных характеристик представлены в табл. 14 и выбираются по последней цифре номера зачетной книжки.

Таблица 14 – Исходные данные

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Допускаемое отклонение формы детали в поперечном сечении, мкм	10	5	8	7	10	4	6	8	10	4
Время измерения t_u , с	1,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1	1,5	2	3	1
Число измерительных сопел k	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1

4.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите теоретические положения.

2. Рассчитайте динамическую погрешность измерения Δ_D и допустимую динамическую составляющую погрешности измерения $[\Delta_D]$.

3. Рассчитайте величину прямолинейного участка характеристики $P_{Z\text{ расч}}$ и выберите параметры пневмосистемы $P_{Z\text{ табл}}$, d_1 , H , K_Z . Параметры пневматической системы занесите в табл. 15.

Таблица 15 – Параметры пневматической системы

Наименование параметра	Варианты значений		
	I	II	III
Прямолинейный участок характеристики $P_{Z\text{ табл}} (\Delta z)$			
Диаметр входного сопла d_1 , мм			
Рабочее давление воздуха H , МПа			
Пневматическое передаточное отношение K_Z , 10^5 Па/мм			
Коэффициент a_{100}			

4. Рассчитайте объем измерительной камеры V , скорость вращения детали n_D , число периодов в минуту синусоидально изменяющегося размера n . Данные занесите в табл. 16.

Таблица 16 – Динамические параметры пневматической системы

Наименование параметра	Значение
Объем измерительной камеры V , м ³	
Скорость вращения детали n_D , мин ⁻¹	
Число периодов в минуту изменения размера детали n , 1/мин	

5. Рассчитайте значения амплитудно-частотной характеристики $A(n) = A_{\text{дин}} / A_{\text{ст}}$ для различных вариантов (I, II, III) значений параметров d_{1i} и H_i , определите оптимальное значение $A(n)$ из условия $\left[K_{zi} \left(\frac{A_{\text{дин}}}{A_{\text{ст}}} \right) i \right]_{\text{max}}$.

6. Рассчитайте динамическую погрешность измерения Δ_D и сравните ее с допускаемой величиной $[\Delta_D]$.

7. Для оптимальных значений d_1 и H , рассчитать и построить амплитудно-частотную характеристику $A(n) = f(n)$ в диапазоне значений n от 0 до 260 пер/мин с дискретностью 20 пер/мин (табл. 17, рис. 22).

Таблица 17 – Значение параметра $A(n)$

Значение n , пер/мин	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
Значение $A(n)$											

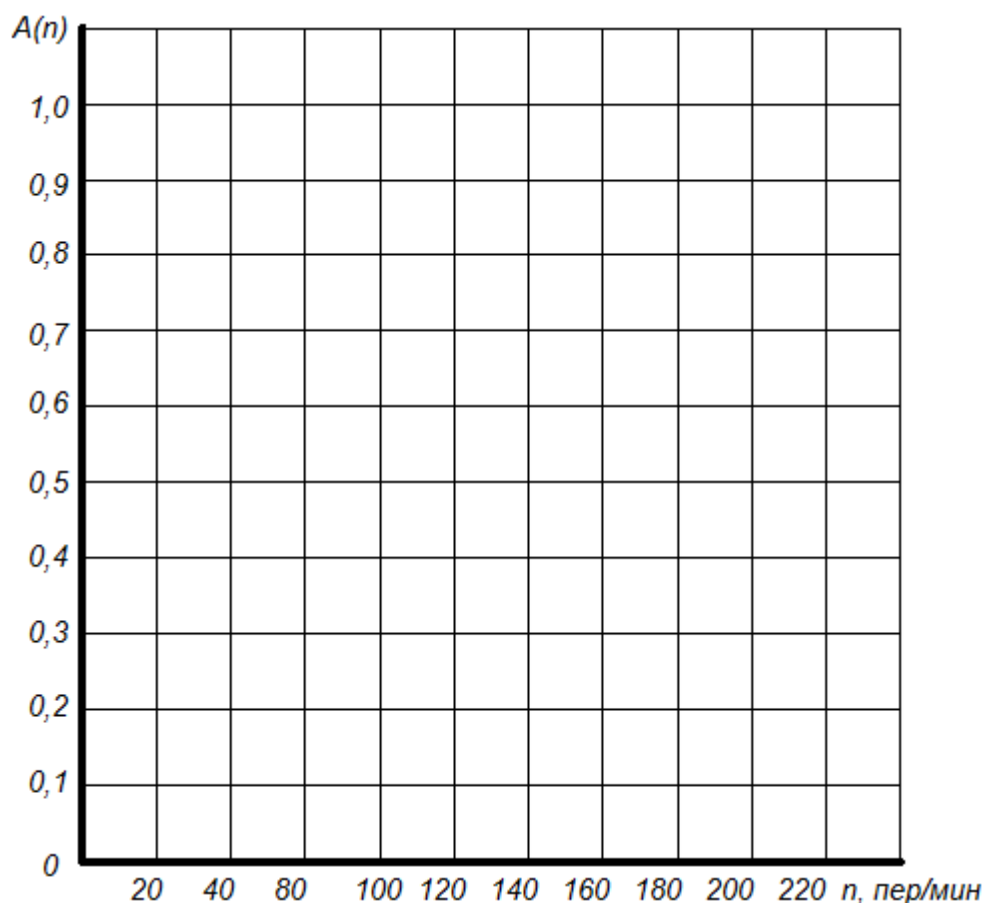


Рисунок 22 – Амплитудно-частотная характеристика

4.4. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Основные теоретические положения.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Расчет допускаемых погрешностей измерения и параметров пневмосистемы (см. табл. 15 и 3.16).
5. Расчет амплитудно-частотной характеристики (см. табл. 17, рис. 22) и динамической погрешности.

4.5. Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются динамические свойства пневматических приборов?
2. Что такое амплитудно-частотная характеристика?
3. Как определить динамическую погрешность пневматической измерительной системы?
4. Какие параметры пневматической измерительной системы влияют на ее динамические свойства?
5. Каким условиям должен удовлетворять диаметр входного сопла d_1 ?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5.

РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА

Цель: изучение принципа действия, характеристик и методики расчета мембранного преобразователя дифференциального типа.

5.1. Теоретические положения

5.1.1. Описание схемы и принципа действия

Использование упругой плоской мембраны в качестве чувствительного элемента пневматического преобразователя позволяет значительно сократить объемы измерительных камер и, следовательно, уменьшить инерционность прибора по сравнению с сильфонной конструкцией [1, 2].

Преобразователи с плоской мембраной часто применяют в сочетании с фотоэлектрическими сортировочными преобразователями, которые имеют шкалу и позволяют выдавать до 50 дискретных сигналов-команд, а также с механотронными или индуктивными приборами. Такие сочетания объясняются тем, что пневматические измерительные устройства малогабаритны и высокоточны, а в существующих, например, фотоэлектрических преобразователях серийного производства просто решается задача дальнейшего преобразования измерительной информации в дискретные сигналы-команды. Сочетание пневматического преобразователя с индуктивными и механотронными приборами при построении измерительного средства создает возможность использования положительных характеристик указанных приборов.

Принципиальная схема мембранного преобразователя приведена на рис. 23, а.

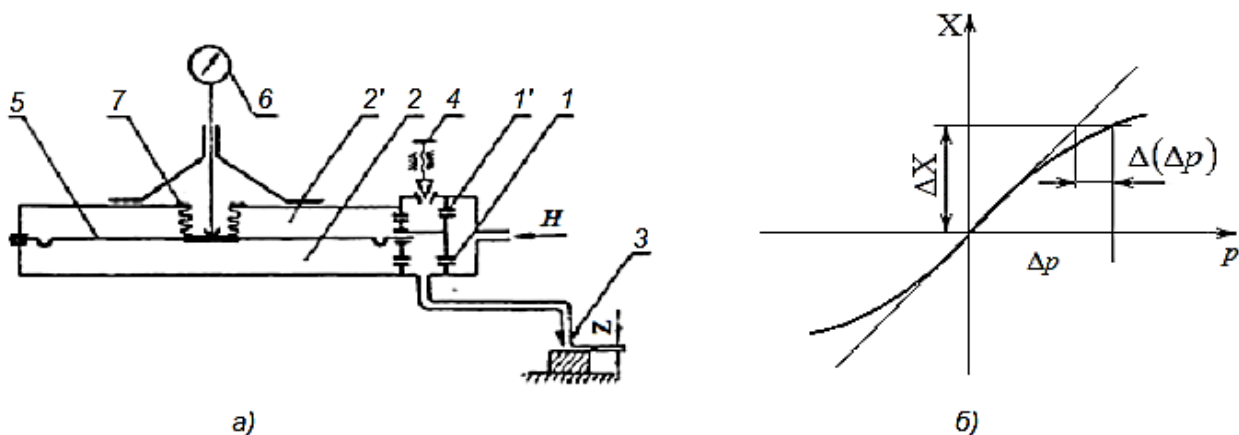


Рисунок 23 – Принципиальная схема пневматического преобразователя с плоской мембраной (а) и его характеристика (б)

Сжатый воздух постоянного давления P через входные сопла 1 и 1' истекает в измерительную камеру 2 и в камеру противодействия 2'. Из камеры 2 воздух истекает в атмосферу через зазор Z между торцом измерительного сопла 3 и контролируемой деталью, а из камеры 2' — через настроечный конический

вентиль 4. При изменении размера контролируемой детали меняется перепад давлений на мембране 5, что вызывает прогиб мембраны. Прогиб фиксируется показывающим прибором 6. Для герметизации камеры 2' служит сильфон 7.

Мембрану с целью уменьшения погрешности обратного хода изготавливают из бериллиевой бронзы, которая обладает весьма малым гистерезисом.

5.1.2. Методика расчета

Расчет мембранного преобразователя заключается в определении по заданной нелинейности характеристики мембраны и чувствительности пневматической схемы основных параметров мембраны, которые обеспечили бы требуемую чувствительность и точность мембранного преобразователя. К параметрам мембраны относятся ее диаметр и толщина.

Суммарная чувствительность мембранного преобразователя

$$K_{\Sigma} = K_Z \cdot K_m = \frac{\Delta P}{\Delta Z} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta P} = \frac{\Delta X}{\Delta Z}, \quad (73)$$

где K_Z — чувствительность схемы, образованной соплами 1 и 3; выбирают по экспериментальным таблицам, исходя из заданного диапазона измерения ΔZ ;

$K_m = \frac{\Delta X}{\Delta P}$ — чувствительность мембраны.

Чувствительность мембраны K_m определяют из зависимости прогиба мембраны x от перепада давлений ΔP на ней, эта величина является характеристикой мембраны и в случае жесткой ее заделки имеет вид

$$\frac{\Delta P R^4}{E b^4} = A \frac{X}{b} + B \left(\frac{X}{b} \right)^3, \quad (74)$$

где $A = \frac{16}{3(1-\mu^2)}$; $B = \frac{2}{21} \cdot \left(\frac{23-9\mu}{1-\mu} \right)$ — постоянные коэффициенты; E — модуль упругости материала мембраны; μ — коэффициент Пуассона, $\mu = 0,3$; R, b — радиус и толщина мембраны соответственно

При малых прогибах мембраны вторым членом правой части уравнения (74) можно пренебречь, и тогда чувствительность

$$K_m = \frac{\Delta X}{\Delta P} = \frac{R^4}{A E b^2}. \quad (75)$$

Наибольшее расхождение $\Delta(\Delta P)$ характеристик $X = f(\Delta P)$, определяемых уравнениями (74) и (75),

$$\Delta(\Delta P) = \left(\frac{AEb^3}{R^4} \right) X + \left(\frac{BEb}{R^4} \right) X^3 - \left(\frac{AEb^3}{R^4} \right) X, \quad (76)$$

а относительное расхождение

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{B}{A} \cdot \left(\frac{X}{b} \right)^2.$$

Характеристики мембраны, определяемые уравнениями (74) и (75), представлены на рис. 23, б, откуда видно, что прямолинейный участок, при котором расхождение $\Delta(\Delta P)$ не превышает определенного заданного значения, занимает область как положительных, так и отрицательных прогибов. Однако в силу несовпадения диаметров заделки мембраны с двух ее сторон крутизна характеристики мембраны меняется при переходе из области положительных в область отрицательных прогибов. Поэтому при построении высокоточных преобразователей с высокой степенью линейности их характеристики в качестве диапазона измерения ΔX (см. рис. 23, б) следует выбирать участок характеристики с прогибом одного знака. В этом случае приведенное выше соотношение определяет относительную погрешность линеаризации δZ характеристики мембраны:

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} = \frac{B}{A} \cdot \left(\frac{\Delta X}{b} \right)^2 = \frac{\Delta(\Delta X)}{\Delta X} = \delta Z_1, \quad (77)$$

где ΔX — перемещение мембраны, соответствующее диапазону измерения преобразователя ΔZ .

Графическим построением можно показать, что нелинейность характеристики мембраны не выпрямляет нелинейность характеристики $P(Z)$ пневматической измерительной схемы, и поэтому суммарная нелинейность

$$\delta Z = \delta Z_1 + \delta Z_2 = \frac{B}{A} \left(\frac{\Delta X}{b} \right)^2 + \delta Z_2, \quad (78)$$

где δZ_1 — нелинейность характеристики $P(Z)$.

Предполагая характеристики $P(Z)$ и $X(\Delta P)$ линейными, можно записать

$$\Delta X = K_Z K_M \Delta Z, \quad (79)$$

тогда

$$\delta Z_1 = \frac{B}{A} \left(\frac{K_Z K_M \Delta Z}{b} \right)^2. \quad (80)$$

Основной составляющей суммарной погрешности измерения является погрешность Δ_Z , вызванная непостоянством ΔN измерительного усилия N отсчетного устройства. Она определяется дополнительным перемещением Δ_X мембраны, вызываемым этим усилием:

$$\Delta_Z = \frac{\Delta_X}{K_Z K_M} = \frac{C}{K_Z K_M} \cdot \frac{\Delta N \cdot R^2}{Eb^3}, \quad (81)$$

где

$$C = \frac{1 - \mu^2}{\pi} \left(\frac{k^2 - 1}{4k^2} - \frac{\ln^2 k}{k^2 - 1} \right),$$

причем k — отношение радиуса мембраны к радиусу жесткого центра. Обычно это отношение достаточно велико, поэтому выражение для постоянной C упрощается:

$$C = \frac{3}{4} \cdot \frac{1 - \mu^2}{\pi}. \quad (82)$$

Относительная погрешность из-за непостоянства измерительного усилия

$$\delta Z_3 = \frac{\Delta_Z}{\Delta Z} = \frac{C}{K_Z K_M \Delta Z} \cdot \frac{\Delta N \cdot R^2}{Eb^3}. \quad (83)$$

Суммарная погрешность измерения в наихудшем случае

$$\delta Z_{\Sigma} = \delta Z_1 + \delta Z_2 + \delta Z_3 \quad (84)$$

или, согласно уравнениям (77), (78) и (81),

$$\delta Z_{\Sigma} = \frac{B}{A} \left(\frac{\Delta X}{b} \right)^2 + \frac{C}{\Delta X} \cdot \frac{\Delta N \cdot R^2}{Eb^3} + \delta Z_2. \quad (85)$$

Из выражения (84) вытекает, что суммарная погрешность будет наименьшей, если параметры мембранного прибора выбирают из условия

$$\frac{d(\delta Z_{\Sigma})}{d\Delta X} = 2 \frac{B}{A} \cdot \frac{\Delta X}{b^2} - \frac{C}{\Delta X^2} \cdot \frac{\Delta N \cdot R^2}{Eb^3} = 0,$$

откуда следует соотношение между толщиной и радиусом мембраны, при котором суммарная погрешность минимальная,

$$R^2 = \frac{2B}{AC} + \frac{E\Delta X^3}{\Delta N} b, \quad (86)$$

где E — модуль упругости первого рода, $E = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм².

Подставляя полученное выражение в уравнение (80), определяем толщину мембраны, необходимую для реализации требуемых метрологических характеристик прибора:

$$b \geq K_Z K_M \Delta Z \sqrt{\frac{2B \cdot \Delta Z}{A \cdot [\Delta]}}, \quad (87)$$

где $[\Delta_Z] = 0,1[\Delta]$ — допускаемая погрешность от колебания измерительного усилия ΔN измерительной головки; $[\Delta]$ — допускаемая погрешность измерения.

Значения K_Z и K_M , определяющие чувствительность мембранного преобразователя, обычно задаются.

5.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета мембранного пневматического преобразователя дифференциального типа представлены в табл. 18.

Номер варианта выбирают по последней цифре номера зачетной книжки.

Таблица 18 – Исходные данные

Наименование параметра	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диапазон измерения ΔZ , мм	0,024	0,044	0,046	0,08	0,1	0,11	0,044	0,05	0,06	0,1
Общее передаточное отношение K_Σ	8	5	5	3	3	3	5	5	5	3
Допускаемая погрешность измерения $[\Delta]$, мм	0,005	0,009	0,01	0,015	0,025	0,021	0,009	0,011	0,015	0,02
Колебание измерительного усилия отсчетного усилия ΔN , Н	0,08	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15	0,2
Пневматическое передаточное отношение K_Z	1,39	1,01	0,7	0,43	0,26	0,14	2,1	1,51	1,16	0,74

5.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите схему, принцип действия и методики расчета преобразователя.
2. Рассчитайте требуемую величину передаточного отношения мембраны K_m .
3. Рассчитайте постоянные коэффициенты A , B , C (см. формулы (74), (82)).
4. Рассчитайте толщину мембраны b (см. формулу (87)).
5. Рассчитайте перемещение мембраны ΔX (см. формулу (73)).
6. Рассчитайте радиус мембраны R^2 исходя из минимальной суммарной погрешности (см. формулу (86)). При малом значении R увеличить толщину мембраны.
7. Рассчитайте значения Δ_Z погрешности, вызванной колебанием измерительного усилия ΔN (см. формулу (81)).
8. Проверьте выполнение условия $\Delta_Z \leq [\Delta_Z]$.
9. В случае невыполнения условия п. 8 увеличьте радиус мембраны R и пересчитайте погрешность Δ_Z .

5.4. Содержание отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Схема преобразователя.
3. Таблиц исходных данных для расчета.
4. Расчет параметров мембранного преобразователя.
5. Таблица расчетных данных (табл. 19).

Таблица 19 – Расчетные данные

№	Наименование параметра	Значение
1	Значение передаточного отношения мембраны K_m , мм/МПа	
2	Постоянные коэффициенты A B C	
3	Толщина мембраны b , мм	
4	Перемещение мембраны ΔX , мм	
5	Радиус мембраны R , мм	
6	Расчётное значение погрешности Δ_Z , мм	
7	Выполнение условия $\Delta_Z \leq [\Delta_Z]$	

5.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства комбинированных пневмоиндуктивных и пневмофотоэлектрических преобразователей?
2. Поясните принцип действия преобразователей?
3. Как определить общее передаточное отношение пневматических мембранных преобразователей?
4. Из какого условия определяется толщина мембраны?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6.

РАСЧЕТ МЕМБРАННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

Цель: изучение принципа действия, характеристик и методики расчета мембранного преобразователя компенсационного типа.

6.1. Теоретические положения

6.1.1. Описание схемы и принципа действия

На рис. 24, а приведена принципиальная схема прибора, построенного по компенсационной схеме [1, 2].

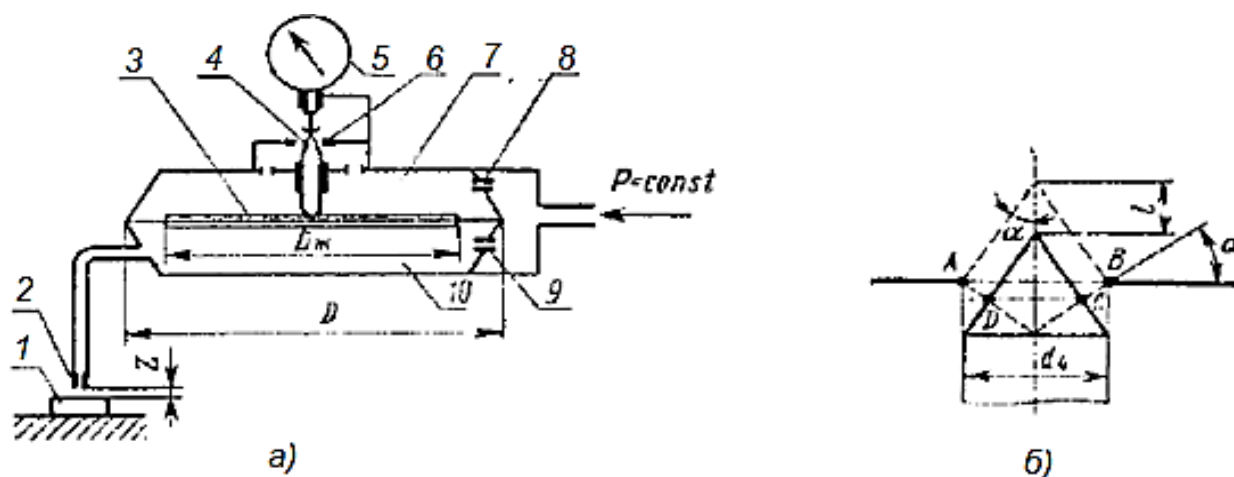


Рисунок 24 – Принципиальная схема компенсационного пневматического преобразователя

Сжатый воздух под постоянным давлением P поступает через входные сопла 8 и 9 в измерительную камеру 10 и компенсационную камеру 7. Из измерительной камеры воздух истекает в атмосферу через измерительный зазор между торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали 1.

Из компенсационной камеры воздух истекает через кольцевой зазор между поверхностями конической иглы 4 и сопла 6. Вялая мембрана 3 находится в покое только в том случае, если давление воздуха в измерительной и компенсационной камерах одинаково. При изменении зазора Z измерительное давление также меняется и равновесие мембраны нарушается. Перемещаясь, мембрана изменяет положение иглы 4 относительно сопла 6 таким образом, что давление в компенсационной камере вновь становится равным измерительному. Перемещение иглы 4, отсчитываемое по шкале измерительной головки 5, является мерой измерения размера контролируемой детали 1.

Формирование электрических команд осуществляется с помощью установленной электрифицированной головки 5 или электроконтактных преобразователей (как предельных, так и амплитудных), измерительные стержни которых конструктивно связаны с перемещением иглы 4.

С помощью компенсационного прибора можно измерять разность двух размеров. Для этого необходимо включить в компенсационную камеру второй

первичный пневматический преобразователь типа сопло—заслонка. Конструктивно эти приборы просты, обладают высокой точностью (погрешность составляет 1...2 мкм), менее инерционны по сравнению с сильфонными приборами. Как правило, они работают при рабочем давлении воздуха $P = 0,1 \dots 0,4$ МПа.

6.1.2. Методика расчета

Зависимость перемещения конической иглы 4 от изменения зазора Z между измерительным соплом 2 и контролируемой деталью 1 определяется из условия компенсации давлений, которое сводится к равенству отношений площадей истечения через сопла компенсационной и измерительной ветвей:

$$\frac{f_6}{f_9} = \frac{f_2}{f_8}. \quad (88)$$

где f_6 — площадь истечения через кольцевой зазор между конической иглой 4 и соплом 6; f_9 — площадь истечения через входное сопло 9, $f_9 = \pi d_9^2 / 4$; f_2 — площадь истечения через кольцевой зазор, образуемый торцом измерительного сопла 2 и поверхностью контролируемой детали, $f_2 = \pi d_2 \cdot Z$; f_8 — площадь истечения через входное сопло 8, $f_8 = \pi d_8^2 / 4$.

Согласно рис. 24, б площадь истечения f_6 , как боковая поверхность усеченного конуса $ABCD$, будет равна

$$f_6 = \pi d_6 \cdot \ell \cdot \sin \alpha - \pi \ell^2 \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (89)$$

Для наилучшего приближения к условиям газодинамического подобия истечения через сопла обеих ветвей прибора и, следовательно, для уменьшения влияния колебания рабочего давления на результаты измерений диаметры входных сопел 8 и 9 следует принимать равными друг другу ($d_8 = d_9$). Тогда условие компенсации примет вид

$$f_2 = f_6. \quad (90)$$

Подставляем в него выражение для площадей f_2 и f_6 :

$$\pi d_2 \cdot Z = \pi d_6 \cdot \ell \cdot \sin \alpha - \pi \ell^2 \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (91)$$

Полученное уравнение преобразуем к виду

$$\ell^2 - (d_6 / \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \ell + d_2 \cdot Z / \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha = 0;$$

$$\ell^2 - 2(d_6 / \sin 2\alpha) \ell + 4d_2 Z \cdot \cos \alpha / \sin^2 2\alpha = 0.$$

Отсюда получим

$$\ell = \frac{d_6}{\sin 2\alpha} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4d_2 \cos \alpha}{d_6^2} Z} \right]. \quad (92)$$

Знак «минус» перед корнем следует из физического смысла полученной зависимости (при $Z = 0$ должно быть $\ell = 0$).

Радикал в выражении (92) разлагаем в ряд Тейлора по степеням величины $\frac{4d_2 \cos \alpha}{d_6^2}$. В большинстве случаев уже квадрат этой величины оказывается настолько малым, что им можно пренебречь по сравнению с единицей. Тогда выражение (92) преобразуется к виду

$$\ell = (d_2 / d_6 \sin \alpha) Z. \quad (93)$$

Чувствительность собственно пневматической измерительной схемы, определяемая как отношение приращения перемещения иглы к приращению измерительного зазора Z , равна

$$K_{II} = \frac{\Delta \ell}{\Delta Z} = \frac{d_2}{d_6 \sin \alpha}. \quad (94)$$

Угол конуса иглы определяют из условия обеспечения заданной цены деления прибора (заданной чувствительности K_{Σ}). Как следует из принципиальной схемы, показанной на рис. 24, а, суммарная чувствительность всего прибора

$$K_{\Sigma} = K_{II} \cdot K_{\Gamma}, \quad (95)$$

где K_{Γ} — передаточное отношение головки 5.

Если в приборах в качестве измерительной головки используют индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм, то передаточное отношение головки составит $K_{\Gamma} = 157$. Это объясняется тем, что индикаторы часового типа надежны в работе и при работе в измерительной цепи с первым точным повышающим звеном (пневматическая измерительная схема) позволяют построить прибор высокой точности.

Таким образом,

$$K_{II} = K_{\Sigma} / K_{\Gamma}, \quad (96)$$

Тогда половина угла конуса иглы в соответствии с формулой (94)

$$\alpha = \arcsin d_2 / d_6 K_{II}. \quad (97)$$

В существующих приборах $d_6 = 3$ мм. Эффективную площадь мембраны находят из условия, что составляющая погрешности измерения Δz , вызванная колебаниями измерительного усилия применяемой головки и приложенных дополнительных усилий со стороны, например, контактных пружин, если последние включены в кинематическую цепь прибора, не должна превышать допустимого значения $[\Delta z]$:

$$\Delta z = \frac{\Delta N}{F_{\text{э}} K_z} \leq [\Delta z], \quad (98)$$

где Δz — составляющая погрешности, вызванная колебаниями усилия измерительной головки 5; ΔN — наибольший суммарный перепад усилий, действующий на мембрану от головки и контактных пружин; K_z — передаточное отношение первичного пневматического преобразователя, образованной соплами 2 и 9, $[\Delta z] = 0,1[\Delta]$; $[\Delta]$ — допускаемая погрешность измерения.

Эффективная площадь мембраны

$$F_{\text{э}} = \pi D^2 / 12 \left[1 + D_{\text{ж}} / D + (D_{\text{ж}} / D)^2 \right], \quad (99)$$

где D — диаметр заделки мембраны; $D_{\text{ж}}$ — диаметр жёсткого центра.

Обычно принимают $D_{\text{ж}} / D = 0,8$, тогда

$$F_{\text{э}} = 0,8133\pi D^2 / 4. \quad (100)$$

Чтобы погрешность измерения не превышала допускаемого значения, эффективная площадь мембраны, согласно неравенству (98), не должна быть меньше

$$F_{\text{э}} \geq \Delta N / K_z \cdot \Delta z. \quad (101)$$

Отсюда можно найти диаметр мембраны и жесткого центра:

$$D \geq 1,25 \sqrt{\Delta N / K_z \cdot \Delta z}, \quad (102)$$

$$D_{\text{ж}} = 0,8D. \quad (103)$$

6.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета мембранного преобразователя компенсационного типа представлены в табл. 20.

Таблица 20 – Исходные данные для расчета мембранного преобразователя

Наименование параметра	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Допускаемая погрешность измерения $[\Delta]$, мм	0,005	0,009	0,01	0,015	0,025	0,021	0,009	0,016	0,015	0,020
Диаметр входного сопла d_1 , мм	1,06	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	0,6	0,7	0,8
Диапазон измерения ΔZ , мм	0,024	0,044	0,049	0,08	0,10	0,11	0,044	0,05	0,66	0,1
Пневматическое передаточное отношение K_z , Мпа/мм	1,39	1,01	0,70	0,43	0,26	0,14	2,1	1,51	1,16	0,74
Колебание величины измерительного усилия ΔN , Н	0,08	0,1	0,15	0,2	0,08	0,1	0,15	0,2	0,08	0,1
Чувствительность прибора, K_Σ	472	393	314	236	188	188	393	314	236	188

6.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите схему, принцип действия и методику расчета преобразователя.
2. Рассчитайте площади проходного сечения входных сопел f_8 , f_9 , измерительного сопла f_2 и компенсационного сопла f_6 (см. формула (88)) и запишите в таблицу расчетных данных (см. табл. 21).
3. Рассчитайте чувствительность пневматической измерительной схемы K_{II} (см. формулу (96)).
4. Рассчитайте половину угла конуса иглы α (см. формулу (97)).
5. Рассчитайте диаметр мембраны D и жесткого центра $D_{ж}$ (см. формулы (102) и (103)).
6. Рассчитайте эффективную площадь мембраны F_3 (см. формулу (100)).
7. Рассчитайте значение Δz погрешности, вызванной колебанием измерительного усилителя ΔN (см. формулу (98)).
8. Проверьте выполнение условия $\Delta z = 0,1[\Delta]$ (см. формулу (98)).
9. В случае невыполнения условия по п. 8 увеличить диаметр мембраны D .

6.4. Содержание индивидуального отчета

1. Наименование и цель задания.
2. Схема преобразователя.
3. Таблица исходных данных для расчета.
4. Расчет параметров преобразователя.
5. Таблица расчетных данных (табл. 21).

Таблица 21 – Расчетные данные

№	Наименование параметра	Значение
1	Площади проходных сечений сопел	$f_8 =$
		$f_9 =$
		$f_2 =$
		$f_6 =$
2	Чувствительность пневматической схемы K_{II}	
3	Половина угла конуса иглы α , град	
4	Диаметр мембраны D , мм	
5	Диаметр жесткого центра $D_{Ж}$, мм	
6	Расчетное значение составляющей погрешности Δz , мм	
7	Выполнение условия $\Delta z = 0,1[\Delta]$, да/нет	

6.5. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия преобразователя.
2. Диапазон рабочих давлений воздуха?
3. Условие компенсации давления в преобразователе?
4. Как регулируется передаточное отношение мембранного преобразователя?
5. Как определить общее передаточное отношение прибора?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7.

РАСЧЕТ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ЗАЗОРА

Цель: изучение принципа действия, характеристик и методики расчета емкостных преобразователей.

7.1. Теоретические положения

7.1.1. Описание схемы и принципа действия

Основное преимущество емкостных методов измерения состоит в том, что конденсаторы можно изготавливать с большой точностью и малыми потерями [1, 2, 11, 12]. На рис. 25 показана схема емкостного преобразователя, в котором емкость изменяется в результате изменения расстояния δ между электродами конденсатора, один из которых (электрод 1) неподвижен, а другой (электрод 2) подвижен и связан с измерительным наконечником 3, контактирующим с измеряемой деталью 4 высотой h_i .

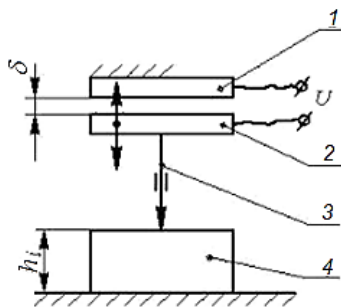


Рисунок 25 – Схема емкостного преобразователя

Недостатком емкостных методов измерения является малая емкость конденсаторов, используемых в качестве преобразователей. Эта емкость бывает от сотен (максимум тысяч) пикофарад до сотых и тысячных долей, а в порядке исключения и до миллионных долей пикофарады. Поэтому для измерений преимущественно используются высокочастотные методы.

Емкость, включенная в цепь переменного тока, ведет себя как сопротивление. Зависимость сопротивления конденсатора от частоты f и емкости C выражается формулой

$$X_C = 0,16 / f C . \quad (104)$$

Емкостное сопротивление обладает тем особым свойством, что протекание электрического тока по нему не сопровождается выделением теплоты. Напряжение и ток в емкостном сопротивлении не синфазны; напряжение на четверть периода (установившегося гармонического колебания) отстает от тока.

7.1.2. Методика расчета

При расчетах емкостных преобразователей с изменением воздушного зазора можно воспользоваться следующими соотношениями.

1. Электрическая емкость преобразователя

$$C_{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_C F}{\delta}, \quad (105)$$

где $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ — диэлектрическая постоянная, Ф/м; ε_C — относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\varepsilon_B = 1,00059$); F — площадь перекрытия пластин (электродов), мм²; δ — измеряемое перемещение (величина воздушного зазора), мм.

2. Чувствительность преобразователя:

$$S_{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_B \cdot F}{\delta^2}. \quad (106)$$

3. Электрическое сопротивление преобразователя

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_{\delta}} = \frac{\delta}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_B F}, \quad (107)$$

где f — частота питающего напряжения.

7.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета емкостного преобразователя приведены в табл. 22 и выбираются по последней цифре зачетной книжки.

Таблица 22 – Исходные данные

Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D , мм	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
δ_{max} , мм	0,5	0,7	1,0	10	2,0	1,0	1,5	5,0	6,0	10,0
f , МГц	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	2,0
$\Delta\delta$, мм	0,1	0,1	0,1	1,0	0,2	0,1	0,2	1,0	1,0	1,0

7.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите принцип действия и методику расчета преобразователя.
2. Рассчитайте значения емкости C_{δ} , чувствительности преобразователя S_{δ} и электрического сопротивления X_C по формулам (104)–(105) с шагом $\Delta\delta$, указанным в табл. 22.
3. Расчетные значения C_{δ} , S_{δ} , X_C занесите в табл. 23 и постройте графики зависимостей $C_{\delta} = f(\delta)$, $S_{\delta} = f(\delta)$, $X_C = f(\delta)$ (рис. 26, а–в).

Таблица 23 – Результаты расчетов

δ , мм	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_{δ} , пФ											
S_{δ} , пФ/мм											
X_C , кОм											

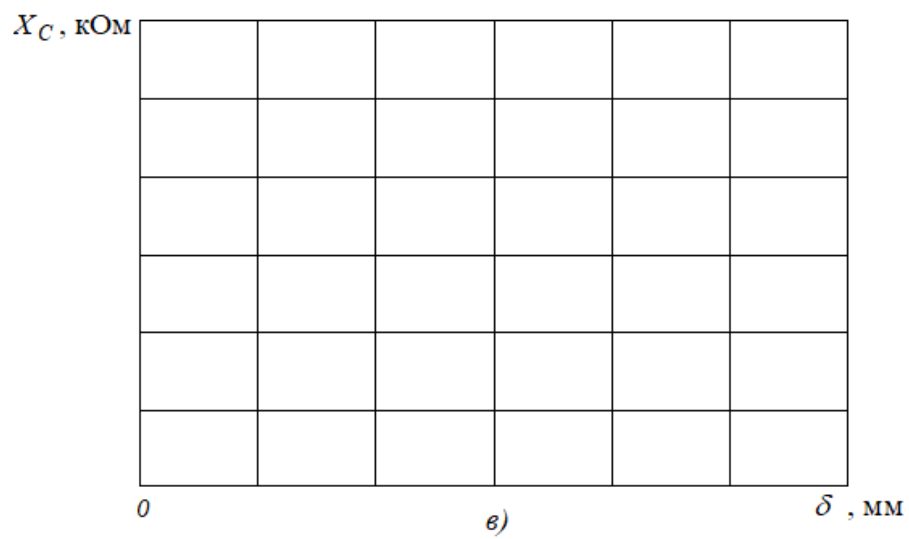
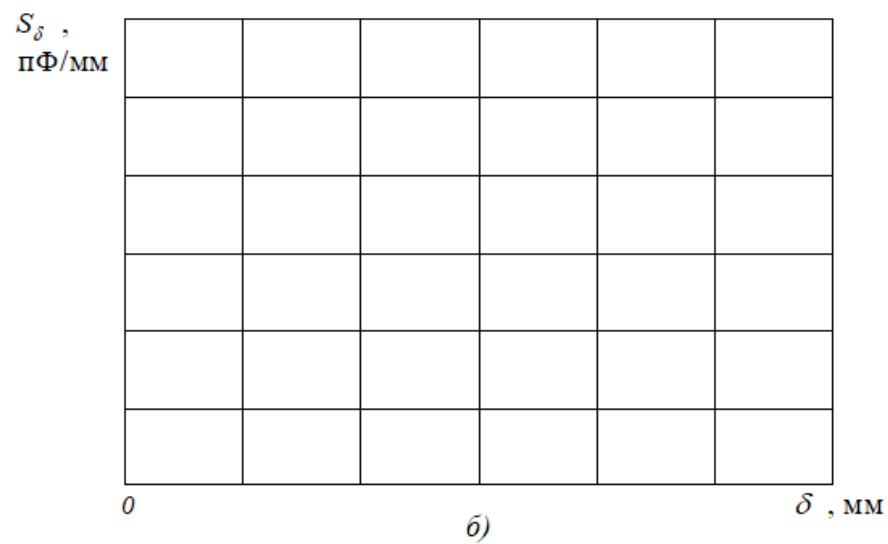
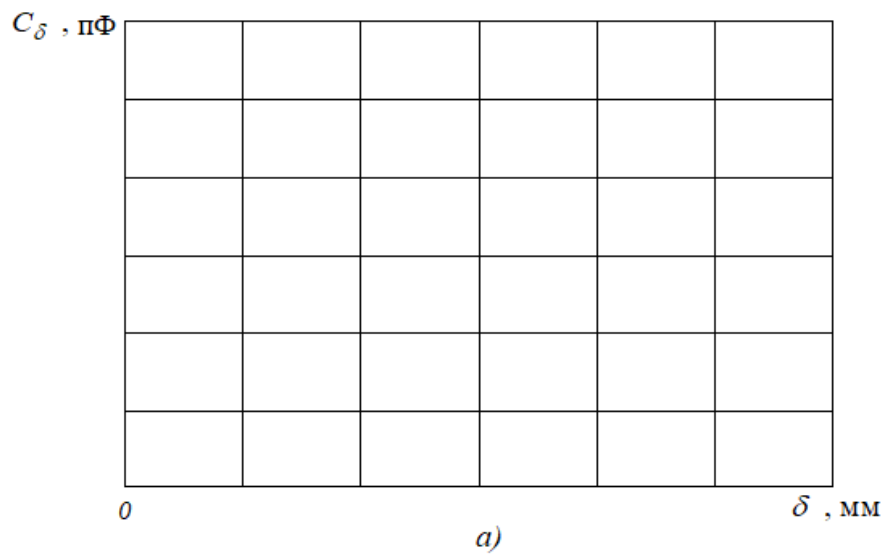


Рисунок 26 – Графики зависимостей:

а — $C_\delta = f(\delta)$, б — $S_\delta = f(\delta)$, в — $X_C = f(\delta)$

7.4. Содержание индивидуального отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Схема преобразователя.
3. Таблица исходных данных.
4. Таблица расчетных данных.
5. Графики зависимостей $C_\delta = f(\delta)$, $S_\delta = f(\delta)$, $X_C = f(\delta)$.

7.5. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия преобразователя?
2. Перечислите недостатки емкостных преобразователей?
3. Измерение каких параметров емкостных преобразователей используется при контроле физических величин?
4. В чем достоинство схемы емкостного преобразователя с переменной площади перекрытия пластин?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8.

РАСЧЕТ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ

Цель: изучить принципы действия, характеристик и методики расчета емкостного преобразователя для контроля толщины диэлектрической ленты.

8.1. Теоретические положения

8.1.1. Описание схемы и принципа действия.

Емкость любого плоского конденсатора может быть представлена в общем виде формулой

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_C \cdot F}{\delta}, \quad (108)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная.

Из формулы (108) очевидно, что изменение емкости переменного конденсатора может происходить при изменении площади пластин F , расстояния между пластинами δ и величины диэлектрической проницаемости среды ε_C либо при одновременном изменении этих величин. Эти свойства конденсаторов с переменной емкостью и положены в основу работы емкостных преобразователей [1, 2, 11, 12].

Конструкция емкостных преобразователей, а следовательно, и датчиков на их основе, определяется прежде всего видом измеряемой величины и способом ее воздействия на емкость преобразователя.

Способы изменения емкости конденсатора определяют области использования емкостных преобразователей.

Изменение расстояния δ между электродами емкостного преобразователя используется для измерения больших и малых давлений, биений вращающихся тел и т.д.

Изменение площади пластин F емкостного преобразователя широко используется в радиотехнике и автоматике для преобразования угловых перемещений в изменение емкости, например, для контроля положения стрелок измерительных приборов, контроля угла открытия шиберов, задвижек, угла наклона стрел землеройных машин и т.д.

Как правило, емкостные преобразователи с переменным расстоянием между пластинами и с переменной площадью пластин нуждаются в малых усилиях для перемещения их электродов. Это обстоятельство позволяет использовать емкостные измерители рассогласования в следящих системах, где недопустима заметная нагрузка на исполнительное устройство.

Изменение диэлектрической проницаемости среды ε_C между электродами емкостного преобразователя наиболее широко применяется в производственных процессах, где необходимы контроль или регулирование уровня сыпучих и жидких веществ.

При измерении уровня или границы раздела двух сред, являющихся агрессивными или взрывоопасными, среди имеющихся методов наиболее предпочтительным является емкостной метод благодаря простоте защиты чувствительных элементов от коррозии и искробезопасным значениям электрических параметров их цепей.

Особую группу емкостных преобразователей, основанных на изменении диэлектрической проницаемости окружающей электроды преобразователя среды, составляют счетчики изделий, извещатели охранной сигнализации и измерители толщины различных покрытий. Во всех этих случаях диэлектриком является контролируемая среда, абсолютная диэлектрическая проницаемость которой ε_C всегда больше относительной диэлектрической проницаемости воздуха — $\varepsilon_B = 1,00059$.

Конструктивные схемы емкостных преобразователей выполняются в различных вариантах в зависимости от области применения.

Для измерения толщины δ_L ленты 1 из диэлектрика с ε_L (рис. 27) ее протягивают между электродами 2 и 3, расстояние между которыми — δ .

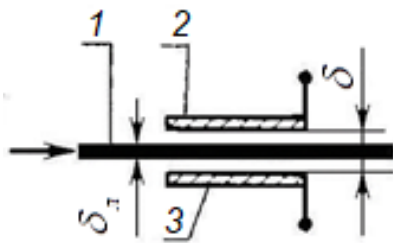


Рисунок 27 – Схема емкостного преобразователя

8.1.2. Методика расчета

При расчетах емкостных преобразователей для измерения толщины диэлектрической ленты можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$C_{\delta_L} = \frac{\varepsilon_0 \cdot F}{\delta - \delta_L(1 - 1/\varepsilon_L)}, \quad (109)$$

$$S_{\delta_L} = \frac{\varepsilon_0 \cdot F \cdot (\varepsilon_L - 1)}{\varepsilon_L \cdot (\delta - \delta_L(1 - 1/\varepsilon_L))^2}, \quad (110)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_{\delta_L}}, \quad (111)$$

где C_{δ_L} , S_{δ_L} , X_C — значение емкости, чувствительность и электрическое сопротивление преобразователя; F — площадь пластин преобразователя; δ , δ_L — зазор между пластинами и толщина диэлектрической ленты соответственно; ε_L — относительная диэлектрическая проницаемость ленты; f — частота напряжения питания.

8.2. Индивидуальные расчетные задания

Исходные данные для расчета емкостного преобразователя приведены в табл. 24 и выбираются по последней цифре зачетной книжки.

Таблица 24 – Варианты индивидуальных заданий

Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F , см ²	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40
δ , мм	5	10	5	20	25	5	10	15	20	25
f , МГц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Измерение толщины ленты, $\varepsilon_l = 2,5$										
δ_l , мм	2	5	5	10	15	0,5	0,5	0,8	3	5
$\Delta\delta$, мм	0,5	1	0,5	2	2	0,5	1	1	2	2

8.3. Порядок выполнения работы

1. Изучите принцип действия и методику расчета преобразователя.
2. Рассчитайте значения C_{δ_l} , S_{δ_l} , X_C по формулам (109)–(111) с шагом $\Delta\delta$, указанным в табл. 24.
3. Расчетные значения C_{δ_l} , S_{δ_l} , X_C занесите в табл. 25.

Таблица 25 – Расчетные значения

δ_l , мм											
C_{δ_l} , пФ											
S_{δ_l} , пФ/мм											
X_C , кОм											

4. По данным табл. 25 постройте графики зависимостей $C_{\delta_l} = f(\delta_l)$, $S_{\delta_l} = f(\delta_l)$, $X_C = f(\delta_l)$ (рис. 28, а–в).

8.4. Содержание индивидуального отчета

1. Наименование и цель занятия.
2. Схема преобразователя.
3. Таблица исходных данных.
4. Таблица расчетных данных.
5. Графики зависимостей $C_{\delta_l} = f(\delta_l)$, $S_{\delta_l} = f(\delta_l)$, $X_C = f(\delta_l)$.

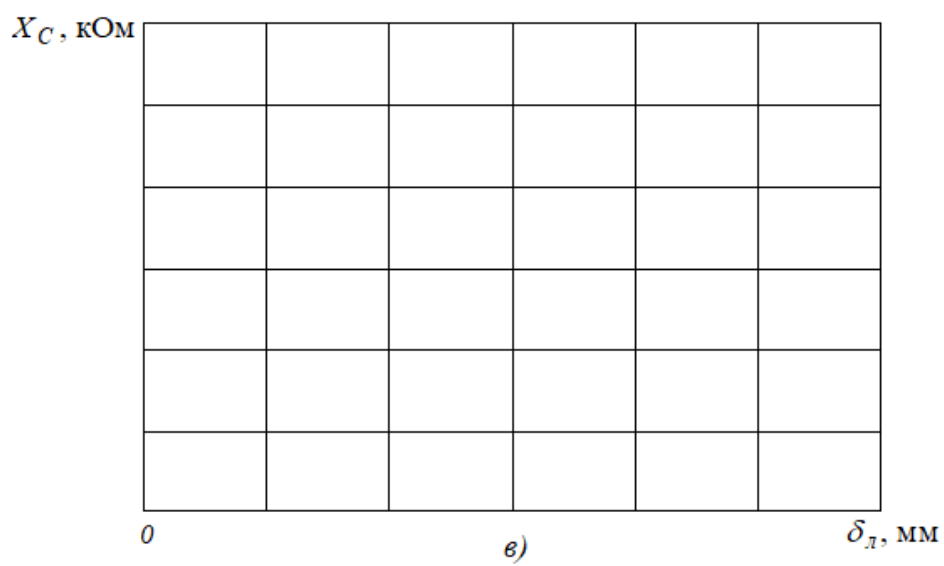
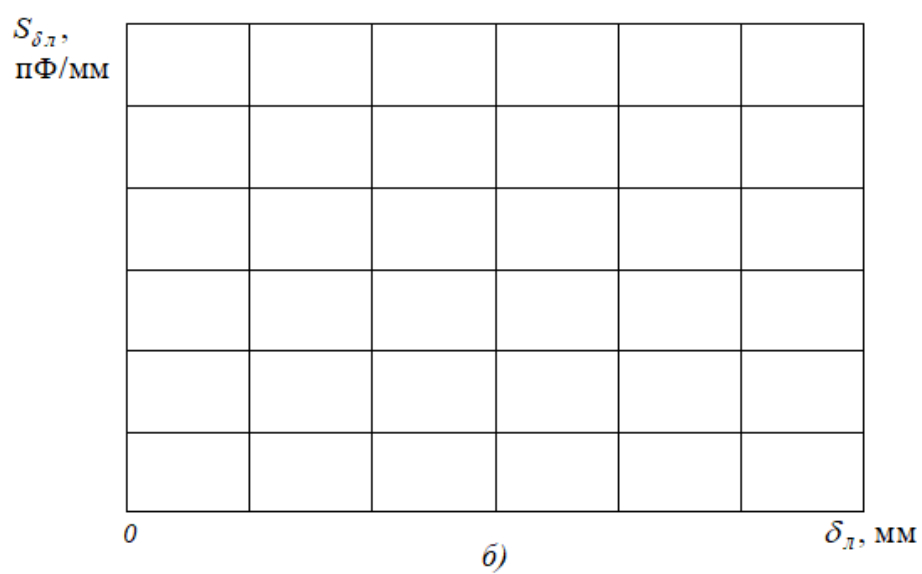
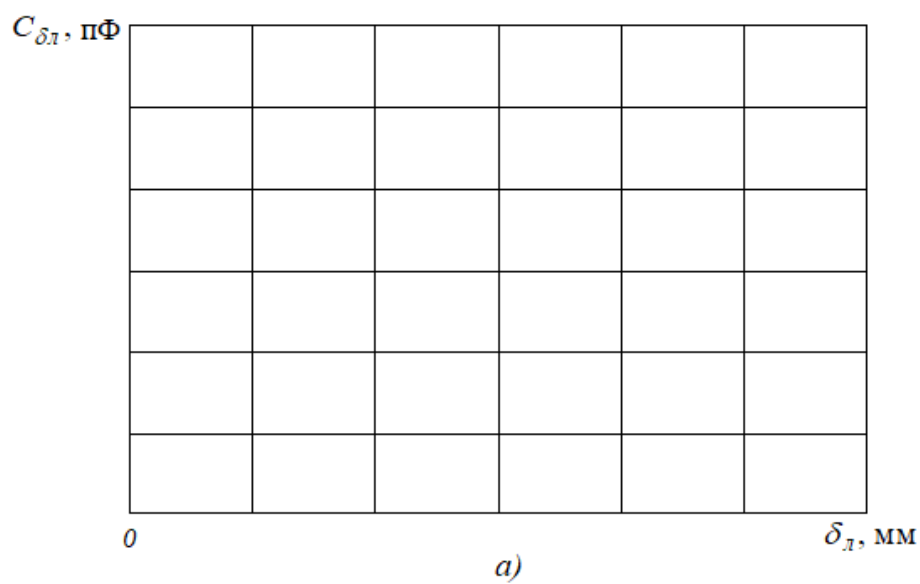


Рисунок 28 – Графики зависимостей:

а — $C_{\delta_l} = f(\delta_l)$, б — $S_{\delta_l} = f(\delta_l)$, в — $X_C = f(\delta_l)$

8.5. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия преобразователя?
2. Перечислите достоинства емкостных преобразователей?
3. Какой тип емкостного преобразователя имеет линейную статическую характеристику?
4. В чем достоинство дифференциальных схем емкостных преобразователей?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Педь, Е. И. Активный контроль в машиностроении / Е. И. Педь. - М. : Машиностроение, 1991. - 359 с. — Текст : непосредственный.
2. Волосов, С. С. Приборы автоматического контроля в машиностроении / С. С. Волосов, Е. И. Педь. - М. : Изд-во Машиностроение, 1970.-310 с. — Текст : непосредственный.
3. Васютенко, А. П. Исследование характеристик мехатронных преобразователей малых перемещений и линейных размеров : метод. рекомендации / А. П. Васютенк. – Севастополь : СевНТУ, 2003. – 14 с. — Текст : непосредственный.
4. Педь, Е. И. Расчет индуктивных преобразователей / Е. И. Педь. - М. : Мосстанкин, 1990-41 с. — Текст : непосредственный.
5. Васютенко, А. П. Расчет индуктивных преобразователей для линейных измерений : метод. указания / А. П. Васютенко, В. Я. Копп, Д. В. Заморёнова, А. В. Недобой. – Севастополь : СевНТУ, 2007. – 28 с. — Текст непосредственный.
6. Васютенко, А. П. Расчет параметров измерительных устройств, преобразователей и погрешности измерительных систем : метод. указания / А. П. Васютенко, О. В. Филипович, Н. А. Волошина, Н. А. Балакина. – Севастополь : СевГУ, 2018. – 69с. — URL: <https://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/8533>.
7. Васютенко, А. П. Выбор параметров и расчет сильфонных преобразователей : метод. указания/ А. П. Васютенко, Д. В. Заморёнова, О. В. Филипович. – Севастополь : СевНТУ, 2007. – 12с. — Текст : непосредственный.
8. Этингоф, М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М. И. Этингоф – М. : АПР, 2016. – 336 с. — Текст : непосредственный.
9. Легаев, В. П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В. П. Легаев; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с. — ISBN 978-5-89368-980-8. Текст : непосредственный.
10. Васютенко, А. П. Измерительное устройство с амплитудно-частотным преобразователем / А. П. Васютенко, Л. В. Недобой, М. И. Гарматюк // Сб. научн. тр. Оптимизация производственных процессов. — Вып. №13. – Севастополь : СевНТУ, 2011. – с.125-128.

11. Джежора, А. А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета : монография / Джежора А. А. – Электрон. текстовые данные. – Минск : Белорусская наука, 2007. – 351 с.

12. Наракидзе, Н. Д. Методы и средства измерений: учебно-методическое пособие к практическим занятиям / Наракидзе, Н. Д., Шайхутдинов Д. В. ; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Новочеркасск : Лик - 24 с. — Текст : непосредственный.

Учебное издание

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ**

Учебно-методическое пособие

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

В авторской редакции

Изд. № 86/2024. Объем 5 п.л. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,9.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»