

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра метрологии и стандартизации

**В.Т. Ревин**

***ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ***

Учебное пособие  
для студентов специальности I-54 01 01  
«Метрология, стандартизация и сертификация»  
всех форм обучения

В 5-ти частях

Часть 5

Минск 2005

УДК 621.317.7 + 006.91 (075.8)

ББК 30.10 я 73

Р 32

Рецензент:

ведущий научный сотрудник ИПФ НАН Беларуси,  
канд. техн. наук Н.В. Любецкий

**Ревин В.Т.**

Р 32 Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие для студ. спец. I-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация» всех форм обуч. В 5 ч. Ч. 5 / В.Т. Ревин. – Мн.: БГУИР, 2005. – 96 с.: ил.

ISBN 985-444-807-X (ч. 5).

В пятой части учебного пособия продолжается рассмотрение преобразователей для регистрации измерительной информации на основе магнитной и лазерной записи, рассматриваются вопросы преобразования и нормирования измерительной информации с помощью соответствующих преобразователей, уделяется внимание линеаризации функции преобразования измерительных преобразователей. Приводятся примеры средств измерений, созданных на основе совокупности преобразователей, рассмотренных в предыдущих частях пособия. Оценены их технические и метрологические характеристики.

УДК 621.317.7 + 006.91 (075.8)  
ББК 30.10 я 73

Часть 1 издана в БГУИР в 2002 г., часть 2 – в 2003 г., части 3 и 4 – в 2004 г.

ISBN 985-444-807-X (ч. 5)  
ISBN 985-444-372-8

© Ревин В.Т., 2005  
© БГУИР, 2005

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	
1 Регистрация измерительной информации .....	
1.1 Магнитная запись .....	
1.2 Запись цифровых данных на магнитный носитель .....	
1.3 Лазерная запись .....	
1.4 Запись сигналов на магнитооптический носитель .....	
Контрольные вопросы .....	
2 Преобразование измерительной информации .....	
2.1 Физические сигналы и их обработка .....	
2.1.1 Происхождение физических сигналов и единицы их измерения...	
2.1.2 Цели обработки физических сигналов .....	
2.1.3 Методы и технологии обработки физических сигналов .....	
2.1.4 Сравнение аналоговой и цифровой обработки сигналов .....	
2.2 Линеаризация функций преобразования .....	
2.2.1 Линеаризация характеристики преобразования .....	
2.2.2 Коррекция нелинейности характеристики измерительной схемы с параметрическими преобразователями .....	
2.2.3 Коррекция погрешности нелинейности обработкой электриче- ского сигнала – результата преобразования .....	
2.2.4 Коррекция результатов преобразований введением поправок ..	
2.2.5 Цифровые методы линеаризации .....	
2.3 Нормирование измерительной информации .....	
2.3.1. Нормирование диапозитивов сигналов преобразователей.....	
2.3.2. Нормирующие преобразователи.....	
2.3.3. Масштабирование.....	
2.4 Обработка сигналов измерительной информации .....	
2.4.1. Преобразование цифровых сигналов из одной системы счисления в другую.....	
2.4.2. Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно....	
2.4.3. Вычисление результатов косвенных, совокупных и совместных изменений.....	
2.4.4. Сглаживание данных.....	
2.4.5. Статистическая обработка результатов измерений с целью повышения точности.....	
2.4.6. Вычисление статистических характеристик измеряемых величин..	
2.4.7. Вычисление статистических характеристик случайных процессов...	
2.4.8. Сжатие данных.....	
2.4.9. Централизованная и децентрализованная обработка информации...	
2.5 Каналы связи .....	
Контрольные вопросы .....	
3 Измерение неэлектрических и электрических величин с помощью измери- тельных преобразователей .....	
3.1 Вихретоковые преобразователи накладного типа и аппаратура контроля механических величин .....	

3.2 Электроконтактные преобразователи .....	
3.3 Фотоэлектрические преобразователи и приборы на их основе .....	
Контрольные вопросы .....	
4 Основные направления автоматизации приборов для измерения геометрических величин .....	
4.1 Координатные измерительные машины .....	
4.2 Электронные уровни .....	
4.3 Кругломеры с управлением от ЭВМ .....	
4.4 Фотоэлектрические автоколлиматоры .....	
4.5 Лазерные интерферометры .....	
Контрольные вопросы .....	
Литература .....	

Библиотека БГУИР

## ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе наряду с индустрией материальных ценностей все больший удельный вес занимает так называемая индустрия информации, т.е. получение, обработка, хранение и применение сведений самого различного характера. Эти сведения могут быть общественно полезными, если они опираются на единые понятия, являются неискаженными и доступны для практического использования.

Знания нужны человеку для принятия правильного решения. Для человеческой деятельности характерна постановка желаемых целей с последующими действиями, направленными на достижение этих целей. На этом пути человеку приходится принимать решения. Мы стремимся принять оптимальное решение, которое наилучшим образом реализует поставленную цель. Из-за недостатка знаний решение далеко не всегда является очевидным: мы не слышали прогноза погоды или не доверяем ему, не можем судить о свойствах средства измерений только по его внешнему виду. Для принятия решения с заданной надежностью нужно принять меры по получению дополнительных сведений.

Значительную часть знаний о свойствах окружающего нас материального мира мы получаем с помощью средств измерений. Измерения являются связующим звеном между свойствами реальных объектов, явлений и нашими представлениями о них, т.е. нашими знаниями. В конечном счете измерения имеют целью снижение неопределенности в задачах принятия решений. Измерительная информация должна удовлетворять тем же требованиям единства понятий (единообразии мер физических величин), неискаженности (точности мер и измерительных приборов) и доступности. Высокая технологическая цивилизация немыслима без точных измерений и требует серьезной перестройки метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации средств измерений (СИ), к которым относятся, как следует из их определения, и измерительные преобразователи.

Рассмотрев в четырех предыдущих частях учебного пособия вопросы преобразования различных физических величин в электрические сигналы, вопросы индикации и регистрации полученной в процессе преобразования измерительной информации, мы вплотную подошли к созданию средств измерений на базе различных измерительных преобразователей. Применяемые для получения и преобразования измерительной информации средства измерений постоянно обновляются, совершенствуются, их парк уже давно превзошел миллиардный рубеж. Но прежде чем переходить непосредственно к рассмотрению различных средств измерений, необходимо обратить внимание на вопросы получения и преобразования измерительной информации. К этим вопросам прежде всего необходимо отнести линеаризацию функции преобразования различных измерительных преобразователей, нормирование их выходных сигналов, а также последующую обработку сигналов с целью их дальнейшего преобразования, передачи и хранения.

Рассмотрению данных вопросов и посвящена заключительная, пятая часть настоящего учебного пособия.

# 1 РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

## 1.1 Магнитная запись

Распространенным способом регистрации результатов измерений является магнитная запись. Ее можно осуществить, записывая данные на магнитной ленте в аналоговой или в цифровой форме. Начнем с рассмотрения аналоговой магнитной записи, для реализации которой применяют регистрирующее устройство (рисунок 1.1), с помощью которого можно, как правило, писать сразу по многим дорожкам (до 14 дорожек), расположенным рядом друг с другом на одной ленте.

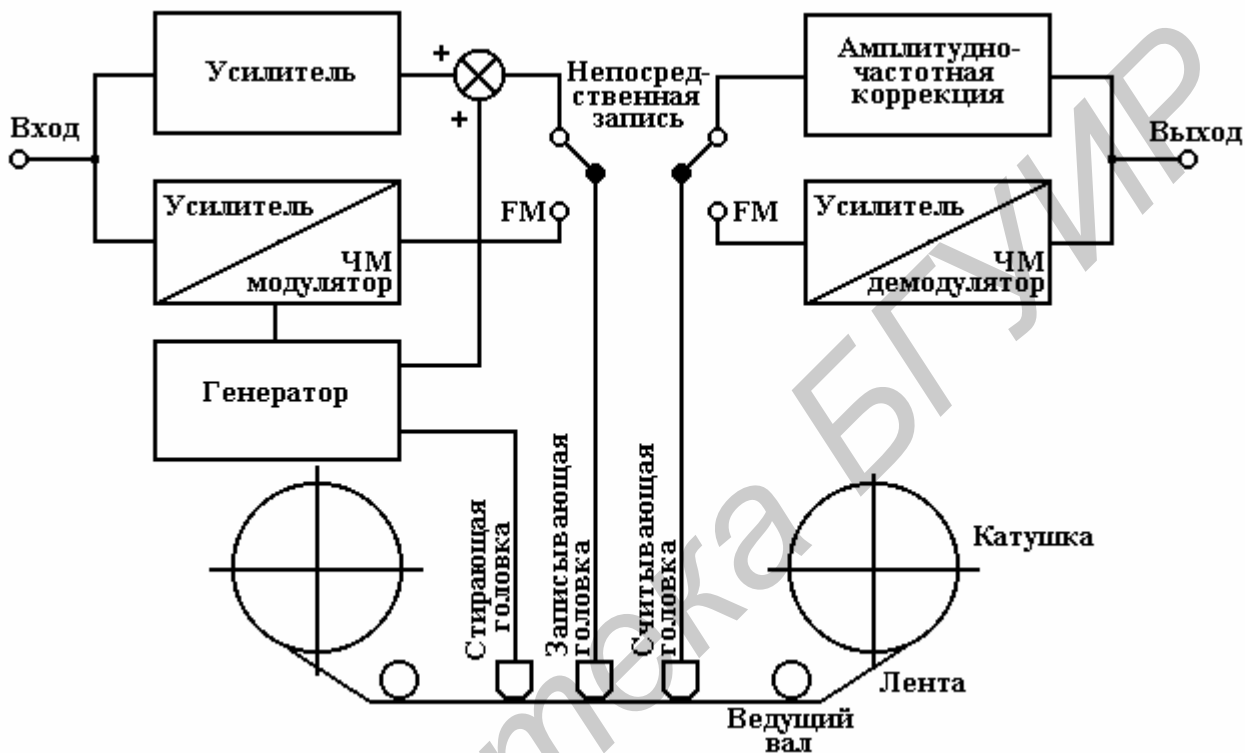


Рисунок 1.1 – Аналоговое регистрирующее устройство, осуществляющее магнитную запись непосредственно и с частотной модуляцией (ЧМ)

Магнитная лента представляет собой гибкую синтетическую пленку (из полихлорвинила или лавсана), которая должна плотно прилегать к выпуклым магнитным головкам устройства; в то же время лента должна быть достаточно прочной, чтобы не растягиваться (и не удлиняться), потому что это привело бы к искажению привязки записанных данных к временной шкале.

Эта пленка, служащая основой ленты, покрыта эмульсией, состоящей из мельчайших ферромагнитных частиц (мелкодисперсного порошка) и связующего вещества. Толщина этого слоя не должна значительно превосходить ширину воздушного зазора в магнитной головке записывающего или считывающего устройств. Чтобы минимизировать шум, возникающий при движении магнитной ленты, размеры магнитных частиц должны быть намного меньше ширины воздушного зазора магнитной головки. Кроме того, ориентация магнитных частиц не должна изменяться при слабых воздействиях. Поэтому для изготовления магнитной ленты обычно применяют окись железа или двуокись хрома. Большое число плотно упакованных маленьких иголок из такого материала помещают в

связующее вещество и располагают так, чтобы они были ориентированы в направлении движения ленты.

Запись сигналов осуществляется путем изменения распределения намагниченности в этом слое окисла. Это распределение создается *записывающей головкой*, принцип действия которой показан на рисунке 1.2.

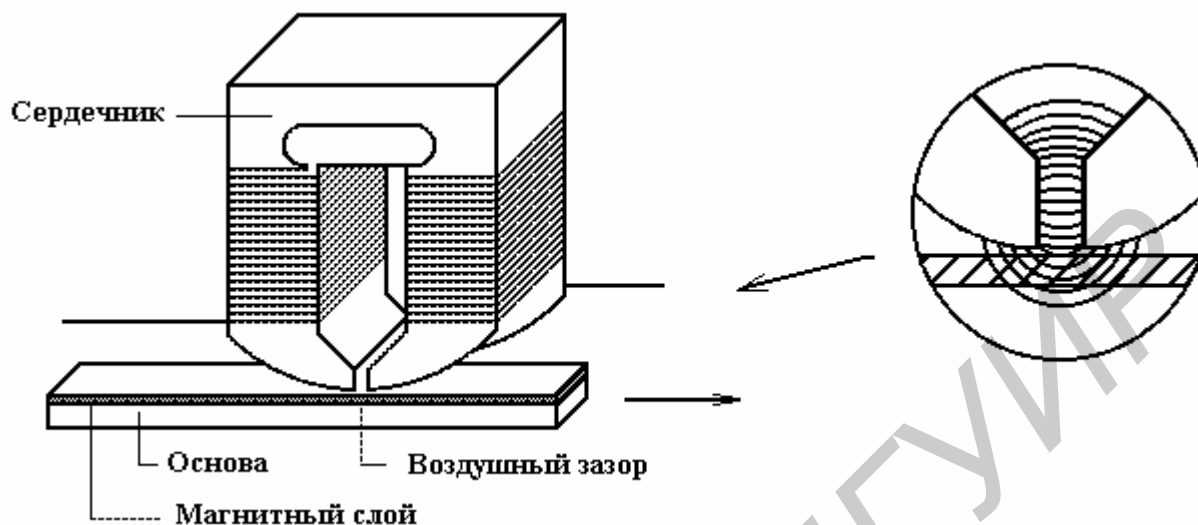


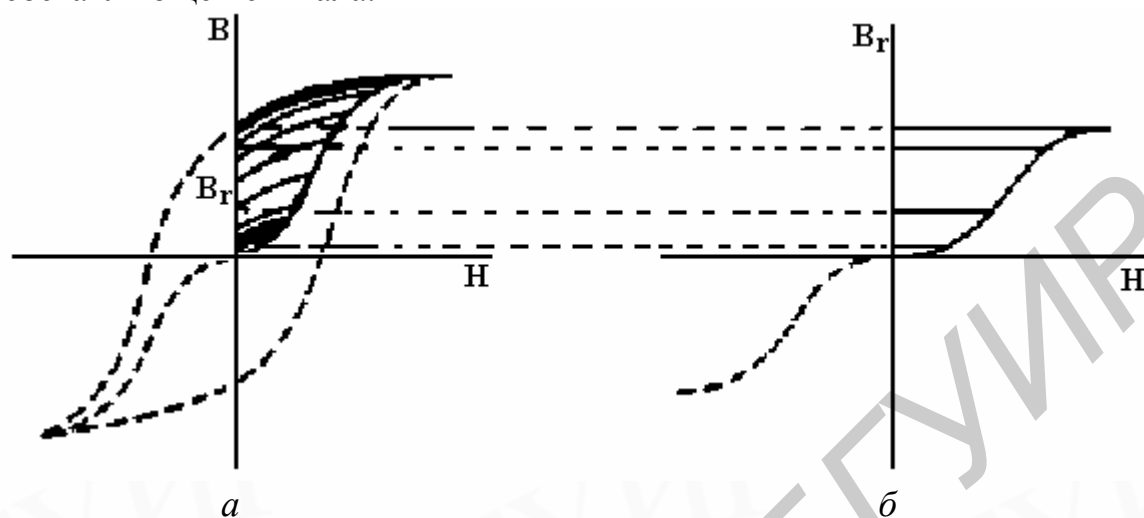
Рисунок 1.2 – Индуктивная записывающая головка в качестве электромагнитного преобразователя

Индуктивная записывающая головка состоит из катушки, намотанной на сердечнике с воздушным зазором. Сердечник изготавливают из материала с высокой магнитной проницаемостью, малым гистерезисом и минимальными потерями из-за вихревых токов, например, из сендаста, слоистого мю-металла или пермаллоя. Напряженность магнитного поля, создаваемого перед воздушным зазором, пропорциональна току, протекающему по катушке. С увеличением напряженности магнитного поля количество постоянно намагниченных в одном и том же направлении частиц на магнитной ленте также растет. К сожалению, связь между напряженностью намагничивающего поля и результатом намагничивания является сильно нелинейной. Это легко видеть из рисунка 1.3. На рисунке 1.3,*а* изображена петля магнитного гистерезиса в ферромагнитном покрытии ленты.

Напряженность магнитного поля  $H$  пропорциональна току, протекающему по магнитной головке. Предположим, что этот ток постоянен, и представим, что под головкой протягивается отрезок предварительно размагниченной ленты. Напряженность магнитного поля, в котором оказывается отрезок магнитной ленты, имеет максимальное значение непосредственно под воздушным зазором, а по мере удаления от него падает. При этом индукция  $B$  изменяется по петле гистерезиса, как показано на рисунке 1.3,*а*. Когда напряженность поля снова становится равной нулю, остаточная индукция  $B_r$  сохраняется. То же самое происходит с  $B_r$  при увеличении тока. Как следует из рисунка 1.3,*б*, соотношение между током  $I$  и остаточной индукцией  $B_r$ , а значит, и между напряженностью магнитного поля  $H$  и  $B_r$  далеко от линейного. Функция, связывающая остаточную индукцию (в данном случае намагниченность)  $B$  и ток  $I$ , имеет мертвую зону, нали-

чие которой приводит к искажению записываемой информации за счет возникновения четных гармоник сигнала.

Для повышения линейности записи на записывающее магнитное поле накладывается высокочастотное переменное поле. Частота этого дополнительного магнитного поля намного выше (примерно в 5 раз) частоты самой высокочастотной составляющей сигнала.



*a* – петля гистерезиса в магнитном слое ленты; *б* – остаточная индукция  $B_r$  (или намагниченность) как функция напряженности поля  $H$

Рисунок 1.3 – Петля магнитного гистерезиса в ферромагнитном слое ленты

Идеальной формой сигнала подмагничивания является прямоугольное колебание. Единственное требование к сигналу подмагничивания – выполнение неравенства  $(X_A - X_S) > X_0/2$ , где  $X_A$  – высокочастотный сигнал подмагничивания;  $X_S$  – входной (записываемый) сигнал;  $X_0$  – ширина мертвой зоны. Если это условие выполнено, то искажения равны нулю. Однако создать сигнал подмагничивания прямоугольной формы практически достаточно трудно. Кроме того, нелинейность не является в полной мере статической, и поэтому какой-то ненулевой уровень искажений всегда остается.

Длина волны записи (ДВЗ) при синусоидальной сигналограмме (записи «чистого» тона) – это расстояние между двумя ближайшими точками, в которых изменение состояния носителя, представляющее запись сигнала, находится в одинаковой фазе. В магнитной записи ДВЗ – это также путь, пройденный данной точкой носителя за время одного периода тока записи:

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны записи, см;

$v$  – скорость движения носителя, см/с;

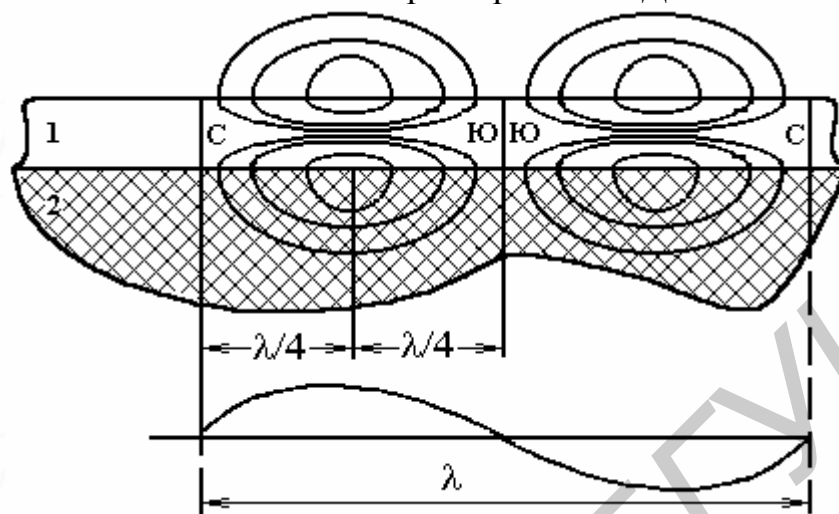
$T$  – период тока записи, с;

$f$  – частота сигнала, Гц.

На рисунке 1.4 показано волнообразное изменение остаточного магнитного потока сигналограммы.



Понятие ДВЗ справедливо в случае малоискаженной записи синусоидальных сигналов, например при магнитной записи с высокочастотным подмагничиванием. При магнитной записи периодических сигналов с высокой плотностью без высокочастотного подмагничивания распределение остаточного магнитного потока носителя близко к синусоидальному независимо от формы тока записи. Поэтому такую запись также можно характеризовать ДВЗ.



1 – рабочий слой магнитного носителя; 2 – подложка

Рисунок 1.4 – Остаточный магнитный поток в двух полуволновых участках синусоидальной сигналограммы

Если магнитная лента движется со скоростью  $v$ , то записываемый периодический сигнал частоты  $f$  будет оставлять на ленте распределение намагниченности с длиной волны  $\lambda = v/f$ . Когда длина волны  $\lambda$  достигает ширины воздушного зазора  $\delta$ , процесс записи нарушается, поскольку вслед за тем, как на данный участок ленты уже что-то записано, происходит запись следующего фрагмента записываемого сигнала. Поэтому должно выполняться неравенство  $\lambda > \delta$ . Ширина полосы при записи тем больше, чем уже воздушный зазор и чем выше скорость движения ленты.

Рассмотренный способ записи иногда называют *непосредственной записью*. При таком способе записи довольно высок уровень мультипликативных помех. Возмущающие воздействия любого рода, такие как ослабевающий контакт между головкой и лентой из-за частиц пыли или несовершенства магнитного слоя на ленте и другие, могут приводить к большим изменениям амплитуды сигнала. По указанной причине непосредственную запись применяют при проведении только таких измерений, в которых регистрируемые сигналы по своей природе нуждаются в исключительно широкой полосе частот, а это достижимо только при данном методе записи. В случае других сигналов информацию можно записывать, осуществляя модуляцию того или иного параметра сигнала. Кроме амплитуды модуляцию можно осуществлять, например, по частоте, по фазе или по ширине импульсов. Этот метод называют записью с модуляцией. В дальнейшем при воспроизведении сигнал демодулируется в канале считывания. Самым распространенным видом модуляции, применяемым в измерительных регистрирующих

устройствах, является частотная модуляция.

ЧМ-метод устраняет многие недостатки метода непосредственной записи. В случае применения ЧМ-метода частота генератора модулируется входным сигналом. Когда входной сигнал равен нулю, частота сигнала на выходе генератора имеет определенное центральное значение. При считывании записанного ЧМ-сигнала он усиливается и ограничивается по амплитуде (поскольку в амплитуде не содержится полезной информации), а затем ЧМ-демодулятором преобразуется в напряжение, пропорциональное отклонению текущего значения частоты от ее центрального значения.

К достоинствам ЧМ-метода относится то, что дефекты магнитной ленты и ее шум не вызывают никаких проблем, так как амплитуда демодулируемого сигнала оказывается более стабильной. Кроме того, нет необходимости в том, чтобы намагниченность магнитной ленты была пропорциональна напряженности магнитного поля при записи. В этом случае обеспечивается высокая линейность демодулированного ЧМ-сигнала. Наконец, еще одно достоинство состоит в том, что с помощью ЧМ-метода можно записывать сигналы постоянного тока. Правда, ценою, которую придется заплатить, будет сокращение полосы частот примерно в десять раз. ЧМ-метод предоставляет также возможность корректировать непостоянство скорости ленты.

Распределение намагниченности на ленте распознается *читающей головкой*, которая выполняет функцию, обратную функции записывающей головки. Поскольку эти электромагнитные преобразователи обратимы, обе головки действуют по одному и тому же принципу. При прохождении мимо головки участков ленты с различной намагниченностью изменяется магнитный поток в сердечнике головки и в ее катушке наводится ЭДС:

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt}.$$

Так как  $\Phi = s \cdot B_r$ , а  $B_r = \mu H$  и  $H = k \cdot I$ , снимаемое напряжение  $U$  связано с током  $I$  в катушке соотношением

$$U = c \frac{dI}{dt},$$

где  $s$  – поверхность, пронизываемая магнитным потоком  $\Phi$ ;

$\mu$  – магнитная проницаемость вакуума;

$k$  – коэффициент пропорциональности с размерностью  $1/\text{м}$ ;

$c = s\mu k$ .

Очевидно, что при магнитной записи происходит дифференцирование сигнала. При увеличении частоты сигнала вдвое коэффициент передачи также увеличивается в 2 раза. Поэтому усилитель в канале считывания должен осуществлять частотную коррекцию сигнала путем интегрирования. Очевидно также, что таким способом нельзя записывать сигналы постоянного тока, так как эти сигналы приводили бы к постоянной намагниченности и неизменному потоку. Следовательно, никакой ЭДС не возникало бы на выходе читающей головки.

По техническим характеристикам измерительные регистрирующие устройства делятся на четыре класса: «узкополосные», «с промежуточной шириной по-

лосы», «широкополосные 1-й группы» и «широкополосные 2-й группы». Скорость ленты бывает стандартизована: 304,8; 152,4; 76,2; 4,8 см/с. Каждое следующее значение скорости в этом списке вдвое меньше предыдущего. Следовательно, полоса частот также уменьшается вдвое при переходе на одну ступень в сторону меньшей скорости.

Распределение устройств по классам производится с учетом ширины полосы и отношения сигнал/шум. Устройство, в котором применена непосредственная запись, со скоростью ленты 304,8 см/с, относящееся к классу «с промежуточной шириной полосы», обеспечит полосу от 300 Гц до 600 кГц и отношение сигнал/шум 40 дБ. У устройства из класса «широкополосные 2-й группы» эти характеристики имеют значения от 500 Гц до 2 МГц и 22 дБ соответственно.

Та же классификация применяется к устройствам с ЧМ-записью. «Узкополосное» устройство регистрации со скоростью ленты 304,8 см/с, центральной частотой 108 кГц и девиацией частоты  $\pm 40\%$  имеет полосу пропускания от 0 до 20 кГц по уровню минус 1 дБ и отношение сигнал/шум на уровне 50 дБ. У устройства из класса «широкополосные 2-й группы» с центральной частотой 900 кГц и девиацией  $\pm 30\%$  спад амплитудно-частотной характеристики на частоте 400 кГц составляет минус 3 дБ, а отношение сигнал/шум 36 дБ.

Достоинством магнитной записи является возможность сжатия или растяжения сигнала во времени простым изменением скорости движения магнитной ленты. Таким путем можно реализовать сдвиг высоко- или низкочастотных сигналов в пределах частотного диапазона измерительной аппаратуры. Можно также производить запись по многим дорожкам на одной ленте, регистрируя, таким образом, не только изменения сигналов во времени, но также и информацию о связи между ними. Это достигается путем применения готовых блоков читающих и записывающих головок. Однажды записанный сигнал можно преобразовывать в электрический сигнал снова и снова, что бывает очень ценно для анализа. Кроме того, запись на ленте можно стирать, вырезать отдельные ее участки и редактировать. Наконец, плотность записи информации на ленте может быть исключительно высокой (т.е. может быть записано очень большое количество измеренных данных).

## **1.2 Запись цифровых данных на магнитный носитель**

Магнитная запись цифровой информации требует преобразования аналоговой или цифровой информации в специальный цифровой код, удобный для передачи по каналу магнитной записи. Этот канал имеет свои особенности, и не всякий код оптимален для передачи по нему цифровых данных. Например, при постоянстве намагниченности носителя как в положительном, так и в отрицательном направлении сигнал на выходе магнитной головки воспроизведения отсутствует и возникает только при переходе намагниченности от одного направления к другому.

Известно много различных способов кодирования и записи цифровых данных на магнитный носитель. Остановимся на трех: запись без возвращения к нулю (БВН1), запись с фазовой модуляцией (ФМ) и запись с групповым кодированием (ГК). В порядке перечисления в этих способах возрастают плотность запи-

си и эффективность обнаружения ошибок, а также уменьшается межблочное расстояние на ленте.

Характеристики способов для записи по восьми дорожкам на ленту шириной 12,65 мм приведены ниже.

Запись данных по способу без возвращения к нулю (БВН1) показана на рисунке 1.5,а. Записываемая единица в данном случае представляет собой перепад тока записи в режиме от положительного до отрицательного насыщения (или наоборот), которому соответствует изменение направления намагниченности и магнитного потока ленты (переход потока – пп). Нуль представляет собой отсутствие изменения тока в соответствующие моменты времени. Для идентификации нулей в этом способе требуется синхросигнал. Если он вырабатывается из импульсов, воспроизводимых с разных дорожек, то плотность записи ограничивается динамическим перекосом ленты.

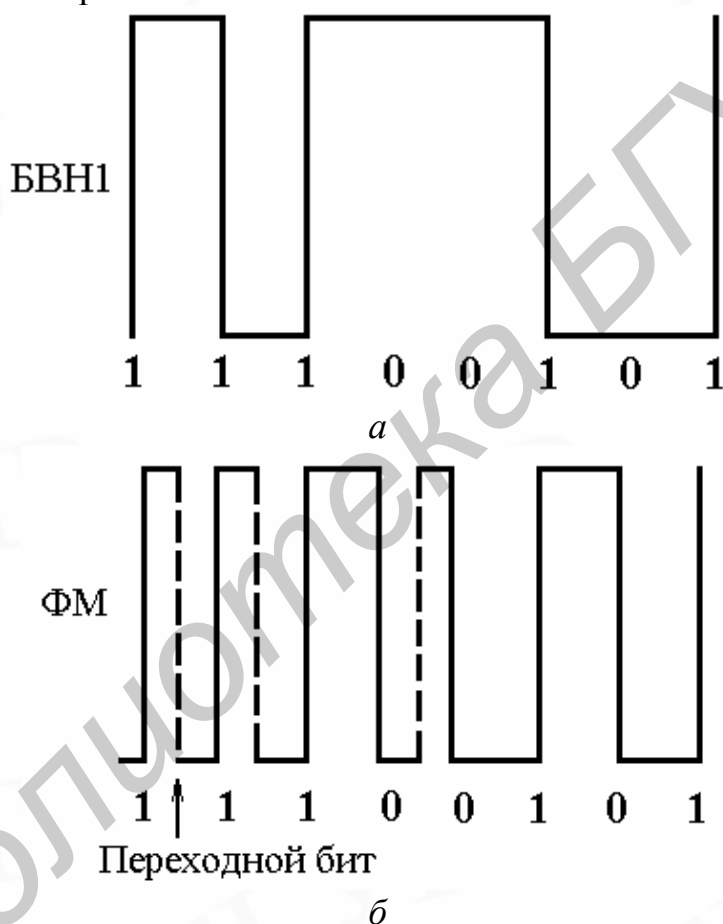


Рисунок 1.5 – Изменение тока записи и намагниченности носителя при записи цифровых данных по способам БВН1 и ФМ

В способе записи с фазовой модуляцией (рисунок 1.5,б) записываемая единица представляет собой перепад тока записи в одном направлении, например в режиме от отрицательного до положительного насыщения, а нуль – перепад тока в обратном направлении. Поскольку разнонаправленным перепадам тока записи при воспроизведении соответствуют выходные импульсы головки различной полярности, то внешнего источника синхроимпульсов для идентификации нулей не требуется; каждая дорожка оказывается самосинхронизированной. Следовательно, устойчивая работа аппаратуры записи обеспечивается при относительно ма-

лом расстоянии между переходами потока. Поэтому рассматриваемый способ ФМ позволяет получить более высокую плотность записи, которая составляет 63 бит/мм.

Недостаток способа ФМ в том, что одному биту соответствует не один, как в способе БВН1, а два перехода потока. Это понятно, поскольку для записи 1 после 1 или 0 после 0 необходимо изменить направление намагниченности ленты, что достигается записью дополнительного перепада тока с удвоенной плотностью (рисунок 1.5,б). Поэтому, например, для записи с плотностью 63 бит/мм необходимо, чтобы лента допускала физическую плотность записи в 126 переходов потока на 1 мм (пп/мм).

*Способ записи с групповым кодированием* обладает достоинствами двух предыдущих способов: запись одного бита соответствует одному переходу потока и вместе с тем каждая дорожка самосинхронизирована. Как и в способе БВН1, единицы представляют собой перепады тока записи, а нули – отсутствие перепадов в данный момент времени. Синхросигнал, необходимый для идентификации нулей при такой записи, вырабатывается из сигнала каждой дорожки. Для этого сигнал кодируется так, что не может быть записано подряд более двух нулей. Обычно используемые 4-разрядные группы двоичных знаков преобразуются в 5-разрядные группы (например, группы 0000 и 0001 преобразуются в группы 11001 и 11011). При этом любая 5-разрядная группа создает не менее двух переходов потока на ленте, что и позволяет вырабатывать собственный синхросигнал для каждой дорожки.

Таким образом, для накопления четырех единиц информации способом группового кодирования требуется пять переходов потока. Поэтому при достигнутой физической плотности записи 356 пп/мм по способу группового кодирования на магнитной ленте может накапливаться информация с плотностью  $356 \frac{4}{5} = 285$  бит/мм.

Возможность исправления ошибок записи, предусмотренная в способе группового кодирования, приводит к некоторому снижению фактически реализуемой плотности накопления информации, и она составляет 246 бит/мм.

### **1.3 Лазерная запись**

Лазерная запись (ЛЗ) представляет собой запись информации остросфокусированным лучом лазера за счет использования теплового или светового действия луча. Носители ЛЗ чаще всего имеют форму диска. В процессе записи под действием лазерного луча происходят локальные изменения физического или химического состояния рабочего слоя носителя, влияющие на его отражательную способность. Воспроизведение записи также осуществляется остросфокусированным лучом лазера и основано на различных эффектах, связанных с отражением излучения лазера рабочим слоем носителя.

*Лазер* (от англ. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света в результате вынужденного излучения) – прибор, обычно используемый как генератор излучения (хотя по определению лазер усиливает свет в результате вынужденного излучения). Содержит активное вещество и систему возбуждения и управления излучением. При возбуждении активного вещества

путем облучения или воздействия электрического поля в нем происходит рекомбинация носителей электрических зарядов и выделяется энергия в виде квантов света; происходит вынужденное излучение лазера. Оно имеет ряд особенностей по сравнению с излучением обычных тел накала: излучение лазера когерентно, т.е. определенным образом упорядочено, и распространяется в заданном направлении, а не во все стороны, как, например, излучение элемента поверхности расплавленного металла. Кроме того, излучение лазера монохроматично, т.е. это свет с одной длиной волны. Указанные особенности позволяют получать очень острую фокусировку излучения лазера и обеспечивают получение круглого фокального пятна диаметром около 1 мкм с большой концентрацией энергии. По применяемому активному веществу и внутреннему устройству лазеры подразделяются на твердотельные, газовые, жидкостные и полупроводниковые. В технике записи лазеры используются в устройствах лазерной записи, электронной фотографии, лазерных принтерах термомагнитного копирования.

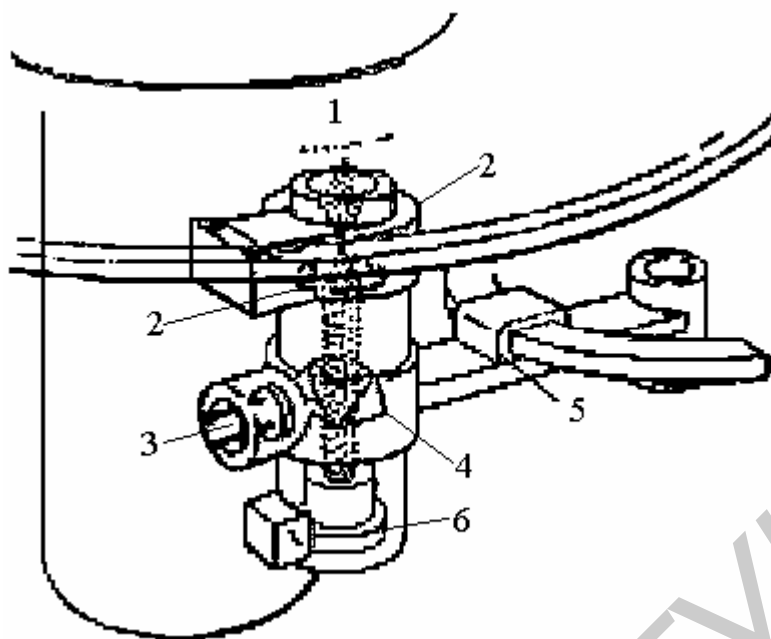
Наибольшее распространение получили полупроводниковые лазеры, используемые в устройствах лазерной записи, – миниатюрные приборы, легко размещаемые в лазерной головке. Поверхность активного вещества, излучающая свет в полупроводниковом лазере, представляет собой квадрат со стороной менее 0,5 мм. Например, мощность полупроводникового лазера в проигрывателе компакт-диска составляет 2–3 мВт.

*Лазерная головка* (ЛГ) является одним из основных элементов аппаратуры лазерной записи, непосредственно осуществляет запись, воспроизведение и стирание информации остросфокусированным лучом лазера. Конструктивные особенности лазерной головки зависят от ее назначения (для записи или воспроизведения или для выполнения обеих функций), от принципа лазерной записи (создание микрорельефа на поверхности носителя, изменение магнитного состояния носителя и др.) и выбранного способа управления положением фокального пятна лазера. Во всех случаях лазерная головка содержит лазер мощностью 1–10 мВт, оптическую систему для фокусировки и управления положением фокального пятна лазера и светоприемники. Последние в записывающей лазерной головке служат для управления положением фокального пятна, а в воспроизводящей лазерной головке наряду с этим выполняют основную функцию – воспринимают отраженное от носителя излучение лазера и преобразуют его в электрический сигнал.

На рисунке 1.6 показана лазерная головка, применяемая для воспроизведения компакт-дисков, а на рисунке 1.7 – вариант оптической схемы такой головки. Излучение полупроводникового лазера проходит через поляризационный расщепитель, линзу коллиматора, четвертьволновую пластинку и фокусируется объективом на отражающем слое компакт-диска. Сигнал регистрируется на лазерном диске в виде частотно-модулированной записи или импульсов двоичного кода, т.е. в виде двух состояний носителя, соответствующих 0 и 1.

Ячейки памяти, содержащие значения 0 и 1, располагаются на лазерном диске по спиральным или концентрическим дорожкам. Размер каждой ячейки определяется свойствами носителя записи и диаметром сфокусированного на рабочем слое лазерного пятна и составляет около 1 мкм. Плотность записи дости-

гает 1 Мбит/мм<sup>2</sup>.



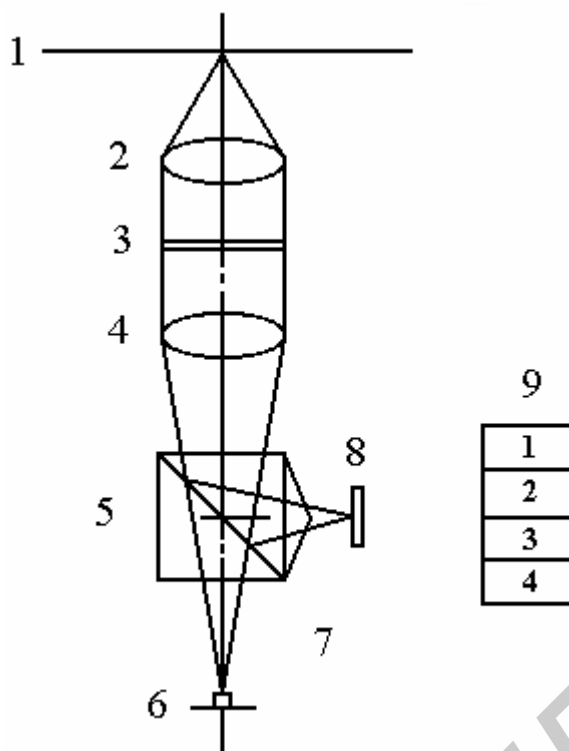
1 – фокальное пятно лазера; 2 – объектив; 3 – светоприемник;  
4 – призма; 5 – тонаром; 6 – полупроводниковый лазер (лазерный диод)

Рисунок 1.6 – Лазерная головка

Известно большое разнообразие систем и средств лазерной записи, отличающихся характером превращений, происходящих в носителе под действием лазерного луча: возможностью или невозможностью стирания и повторной записи информации на носителе и др. Общими элементами систем лазерной записи являются дисковод, лазерная головка, устройства автофокусировки и автотрекинга, дисковый носитель.

Системы лазерной записи подразделяют на три основные разновидности. К первой относят системы, в которых запись производит изготовитель лазерного диска на специализированном предприятии, а потребитель получает диск с нестираемой записью и может только воспроизводить ее, т.е. применять лазерный диск как грампластинку с записанными данными. Лазерные диски для таких систем получили наименование ROM (Read Only Memory). В данной разновидности наиболее важна система компакт-диска (compact-disk – CD), получившая в лазерной технике записи широкое распространение.

Другую разновидность представляют системы, в которых потребитель сам может записать информацию на лазерном диске, но только один раз. Воспроизводить запись можно многократно. Лазерные диски для этих систем получили наименование WORM (Write Once Read Many) или DRAW (Direct Read After Write). Запись на них может происходить различно: прожиганием отверстий (испарением материала) в одном из слоев лазерного диска, изменением фазового состояния, цвета или формы поверхности рабочего слоя. Под изменением фазового состояния подразумевается переход вещества рабочего слоя из кристаллического состояния в аморфное, сопровождающийся изменением отражательной способности рабочего слоя.



- 1 – компакт-диск; 2 – объектив; 3 – четвертьволновая пластинка;  
 4 – коллимирующая линза; 5 – поляризационный расщепитель;  
 6 – полупроводниковый лазер (лазерный диод); 7 – призма;  
 8 – светоприемник; 9 – структура светоприемника

Рисунок 1.7 – Оптическая система лазерной головки

Наконец, третьей разновидностью являются системы лазерной записи, в которых обеспечивается возможность многократной записи, воспроизведения и стирания информации на лазерном диске. Применяемые в этих системах лазерные диски называются реверсивными, стираемыми или перезаписываемыми. К данной разновидности относятся получившие широкое применение в звуко- и видеотехнике системы записи с магнитооптическим воспроизведением.

#### 1.4 Запись сигналов на магнитооптический носитель

В этом способе записи на магнитооптических (МО) эффектах основан процесс воспроизведения, а собственно запись основана на термомагнитных явлениях. Магнитооптический носитель информации, обычно в форме диска, содержит рабочий магнитооптический слой, который представляет собой аморфную магнитную пленку, способную терять намагниченность и коэрцитивную силу при нагреве до определенной температуры и обеспечивать в процессе воспроизведения достаточно большой магнитооптический эффект. Намагниченность и коэрцитивная сила МО-рабочих слоев теряются при температуре 100–200 °С в зависимости от состава слоя.

Запись производится с перпендикулярным намагничиванием МО-слоя. В наиболее простом случае в процессе записи предварительно намагниченный МО-слой локально размагничивается, нагреваясь от острого фокусированного луча лазера. Обычно же запись происходит путем изменения направления предварительной намагниченности МО-слоя на противоположное. Для этого при ло-



кальном нагреве и остывании участка, когда его коэрцитивная сила еще мала, на него воздействуют магнитным полем обратного направления по отношению к полю предварительного намагничивания. Наконец, возможна запись на предварительно ненамагниченный МО-слой или на МО-слой со старой записью при одновременном ее стирании. В этом случае элемент МО-слоя нагревается до температуры, при которой он теряет свои магнитные свойства. Коэрцитивная сила МО-слоя становится малой, и сравнительно небольшое поле магнитной головки сообщает нагретому участку одно из двух направлений намагниченности, которую нельзя изменить после выхода нагретого участка из фокального пятна лазера, так как при снижении температуры коэрцитивная сила МО-слоя возрастает.

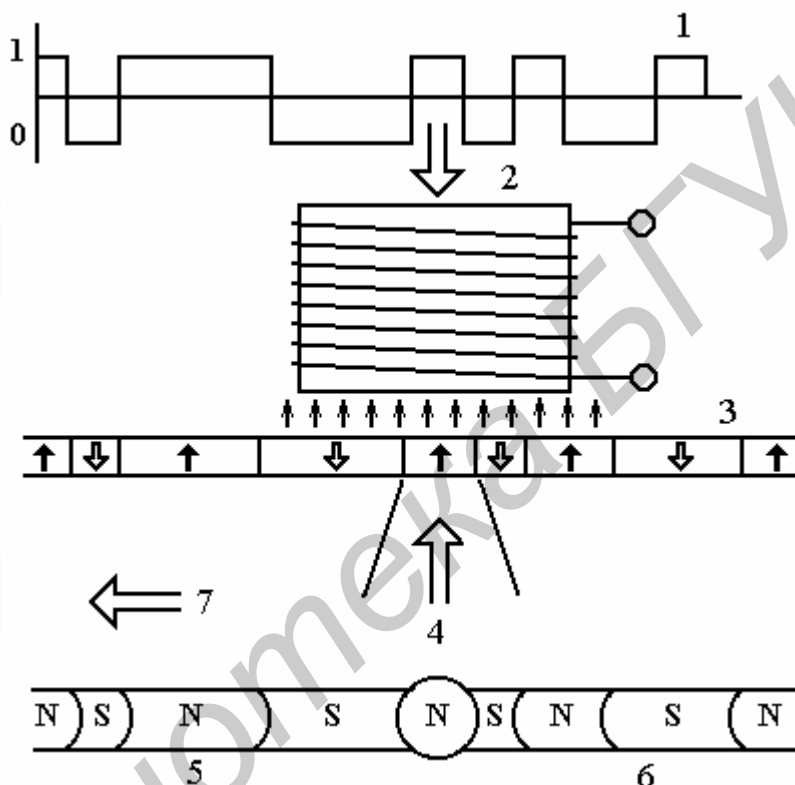
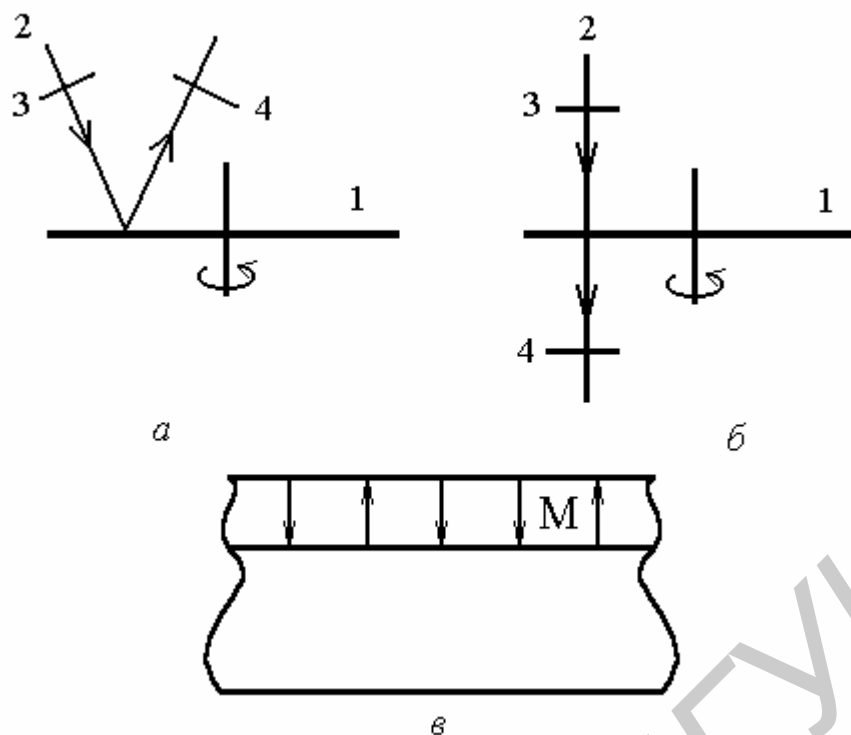


Рисунок 1.8 – Запись сигналов на магнитооптический носитель

Записываемый сигнал 1 (рисунок 1.8) управляет магнитным полем магнитной головки 2, которое воздействует на МО-слой 3. С обратной стороны на МО-слое сфокусирован луч лазера 4. Вблизи точки потери магнитных свойств коэрцитивная сила МО-слоя мала и он легко намагничивается в поле головки записи 2; на МО-слое образуется сигналограмма 5; 6 – «старая» сигналограмма, которая стирается при таком способе записи; 7 – направление движения носителя. Ширина получающейся сигналограммы около 1 мкм. Такой же размер имеет и минимальная длина участков однонаправленной намагниченности.

На МО-носителях сигналы измерительной информации записываются способами цифровой и частотно-модулированной записи. Во всех случаях в результате записи на носителе образуется последовательность намагниченных и размагниченных участков или участков с взаимно противоположной намагниченностью, которая и представляет собой запись на МО-носителе. Записываемый сигнал может управлять лучом лазера или полем магнитной головки.



*a* – воспроизведение на основе МО-эффекта Керра; *б* – воспроизведение на основе МО-эффекта Фарадея; *в* – фрагмент поперечного сечения МО-носителя; 1 – дисковый МО-носитель; 2 – луч света; 3 – поляризатор; 4 – анализатор

Рисунок 1.9 – Принцип воспроизведения информации с МО-носителя (стрелками показаны направления намагниченности МО-слоя, нанесенного на стеклянную подложку)

Воспроизведение записи основано на МО-эффектах Керра и Фарадея. Чаще используется магнитооптический эффект Керра, принцип реализации которого заключается в следующем. Если луч поляризованного света направить на отражающую намагниченную поверхность, то плоскость поляризации отраженного луча изменяется в зависимости от направления и значения намагниченности отражающей поверхности. Соответственно изменяется световой поток, проходящий через анализатор и попадающий на светоприемник, т.е. намагниченная поверхность его модулирует. Отражающей намагниченной поверхностью в системах записи на МО-носителях является МО-слой, а источником света – тот же лазер, что используется для записи, но с уменьшенной мощностью излучения. Принцип воспроизведения информации с МО-носителя приведен на рисунке 1.9. Если в качестве источника света 2 применяется лазер, то поляризатор 3 не требуется.

Запись на МО-носителе можно многократно стирать, как обычную магнитную, повторяя циклы запись → воспроизведение → стирание. Современные МО-диски допускают не менее одного миллиона таких циклов. При этом МО-диск не изнашивается, поскольку лазерная головка с ним не соприкасается, а магнитная головка, применяемая в некоторых способах записи на МО-диски, скользит по специально обработанной поверхности диска, не касаясь рабочего слоя. Поверхностная плотность записи информации на МО-носителях достигает  $10^6$

бит/мм<sup>2</sup>, т.е. примерно такая же, как у магнитной записи. Однако объемная плотность записи на современных МО-дисках сильно уступает объемной плотности магнитной ленты. Действительно, толщина МО-диска не менее 1 мм, и в 1 мм<sup>3</sup> его объема может храниться то же количество информации, что и на 1 мм<sup>2</sup> поверхности, т.е. 10<sup>6</sup> бит. Объемная плотность металлонапыленной магнитной ленты достигает 60 Мбит/см<sup>3</sup>.

Отраженное излучение, промодулированное питами на компакт-диске, через расщепитель и призму поступает на светоприемники. Компоненты данной системы выполняют следующие функции. Линза коллиматора расширяет пучок лучей до заполнения входного зрачка фокусирующего объектива, что необходимо для полного использования его апертуры и, следовательно, получения минимального по размеру фокального пятна. Поляризационный расщепитель пропускает линейно поляризованное излучение лазера к диску и блокирует идущее к лазеру излучение, отраженное от диска, поляризация которого перпендикулярна исходной. Перпендикулярность поляризаций прямого и отраженного излучения достигается с помощью четвертьволновой пластинки. В результате почти все отраженное диском излучение от расщепителя попадает на светоприемники. Здесь на пути излучения имеется призма для автофокусировки по способу Фуко. Автотрекинг осуществляется дифракционным способом. Применение четырех светоприемников позволяет пространственно разделить падающее на них излучение и выделить из него записанный сигнал и сигналы автофокусировки и автотрекинга.

### Контрольные вопросы

- 1 Приведите классификацию преобразователей, предназначенных для магнитной записи. Обоснуйте их принцип действия.
- 2 Как производится запись и воспроизведение информации, записанной на магнитный носитель?
- 3 В чем заключается различие при записи на магнитный носитель аналоговых и цифровых сигналов?
- 4 Как с помощью индуктивных измерительных преобразователей производится преобразование электрических сигналов в изменение намагниченности магнитного слоя ленты?
- 5 Обоснуйте, как с помощью сигнала подмагничивания можно линеаризовать функцию преобразования.
- 6 Какой принцип преобразования сигналов измерительной информации положен в основу лазерной записи? Какие устройства используются при лазерной записи данных?
- 7 Перечислите основные разновидности систем лазерной записи. Дайте им определение.
- 8 Какие физические явления используются при записи информации на магнитооптический носитель? Поясните процесс записи информации на магнитооптический носитель с помощью диаграмм.
- 9 Какие физические явления (эффекты) используются при воспроизведении

информации с магнитооптического носителя? Поясните принцип воспроизведения информации с магнитооптического носителя с помощью диаграмм.

10 Что собой представляет лазерная головка? Какие основные элементы входят в ее состав?

11 Из каких основных элементов состоит оптическая система лазерной головки?

## 2 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

### 2.1 Физические сигналы и их обработка

#### 2.1.1 Происхождение физических сигналов и единицы их измерения

В этом разделе будут рассмотрены вопросы обработки физических сигналов, являющихся основным носителем измерительной информации, выполняемой на основе аналоговых и цифровых методов преобразования. Прежде всего рассмотрим несколько ключевых понятий и определений, необходимых для понимания сущности предмета.

##### **Характеристики сигналов:**

1 Сигналы являются физическими величинами.

2 Сигналы можно измерить.

3 Сигналы содержат информацию.

4 Все сигналы являются аналоговыми.

5 Единицы измерения:

- температура: °С;

- давление: Н/м<sup>2</sup>;

- масса: кг;

- напряжение: В;

- электрический ток: А;

- мощность: Вт.

По своей природе все сигналы являются аналоговыми, будь то сигнал постоянного или переменного тока, цифровой или импульсный. Тем не менее, принято делать различие между аналоговыми и цифровыми сигналами, которое выражается в том, что в природе все измеряемые физические величины представляются аналоговыми сигналами. Аналоговые сигналы характеризуются электрическими переменными, скоростью их изменения и связанной с ними энергией или мощностью. Для преобразования других физических величин (температуры, давления и т.п.) в электрические сигналы используются преобразователи. Такая область, как нормализация сигнала, означает подготовку физических сигналов к обработке и включает в себя такие аспекты, как преобразователи (например, преобразователи температуры и давления), изолирующие и инструментальные усилители и т.д.

Некоторые сигналы представляют собой реакции на другие сигналы. Хороший пример – отраженный сигнал радара или ультразвуковой системы отображения, являющийся результатом действия известного передаваемого сигнала.

С другой стороны, существуют сигналы, которые называются *цифровыми*,

где сигнал, определенным образом обработанный, преобразован в цифровой код. Возможно, эти цифровые сигналы связаны с реальными аналоговыми сигналами, но возможно, что между ними и нет связи. В качестве примера можно привести передачу данных в локальных вычислительных сетях (ЛВС) или в других высокоскоростных сетях.

В случае цифровой обработки сигнала (ЦОС) аналоговый сигнал преобразуется в двоичную форму устройством, которое называется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). На выходе АЦП получается двоичное представление аналогового сигнала, которое затем обрабатывается арифметически цифровым сигнальным процессором (ЦСП). После обработки содержащаяся в сигнале информация может быть преобразована обратно в аналоговую форму с использованием цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

Другой ключевой концепцией в определении сигнала является тот факт, что сигнал всегда несет некоторую информацию. Это ведет нас к ключевой проблеме обработки физических аналоговых сигналов – проблеме извлечения информации.

### **2.1.2 Цели обработки физических сигналов**

Главная цель обработки физических сигналов заключается в необходимости получения содержащейся в них информации. Эта информация обычно присутствует в амплитуде сигнала (абсолютной или относительной), в частоте или в спектральном составе, в фазе или в относительных временных зависимостях нескольких сигналов. Как только желаемая информация будет извлечена из сигнала, она может быть использована различными способами.

В некоторых случаях желательно переформатировать информацию, содержащуюся в сигнале. В частности, смена формата имеет место при передаче звукового сигнала в телефонной системе с многоканальным доступом и частотным разделением. В этом случае аналоговые методы используются, чтобы разместить несколько голосовых каналов в частотном спектре для передачи через радиорелейную станцию микроволнового диапазона, коаксиальный или оптоволоконный кабель. В случае цифровой связи аналоговая звуковая информация сначала преобразуется в цифровую с использованием АЦП. Цифровая информация, представляющая индивидуальные звуковые каналы, мультиплексируется во времени (многоканальный доступ с временным разделением) и передается по последовательной цифровой линии связи.

Еще одна причина обработки сигналов заключается в сжатии полосы частот сигнала (без существенной потери информации) с последующим форматированием и передачей информации на пониженных скоростях, что позволяет сузить требуемую полосу пропускания канала. В высокоскоростных модемах и системах адаптивной импульсно-кодовой модуляции широко используются алгоритмы устранения избыточности данных (сжатия), так же, как и в цифровых системах мобильной связи, системах записи звука MPEG, в телевидении высокой четкости (HDTV).

Промышленные системы сбора данных и системы управления используют информацию, полученную от преобразователей, для выработки соответствующих сигналов обратной связи, которые, в свою очередь, непосредственно управляют процессом. Обратите внимание на то, что эти системы требуют наличия как

АЦП и ЦАП, так и преобразователей, устройств нормализации сигнала и ЦСП (или микроконтроллеров). В некоторых случаях в сигнале, содержащем информацию, присутствует шум и основной целью является восстановление сигнала. Такие методы, как фильтрация, автокорреляция, свертка и т.д., часто используются для выполнения этой задачи и в аналоговой, и в цифровой областях.

Итак, **к целям обработки сигналов** относятся:

- 1 Извлечение информации о сигнале (амплитуда, фаза, частота, спектральные составляющие, временные соотношения).
- 2 Преобразование формата сигнала.
- 3 Сжатие данных.
- 4 Формирование сигналов обратной связи (управление промышленными процессами).
- 5 Выделение сигнала из шума (фильтрация, автокорреляция, свертка).
- 6 Выделение и сохранение сигнала в цифровом виде для последующей обработки (быстрое преобразование Фурье – БПФ).

### **2.1.3 Методы и технологии обработки физических сигналов**

Сигналы могут быть обработаны с использованием методов аналоговой обработки сигналов, цифровых методов обработки сигналов или комбинации аналоговых и цифровых методов (комбинированной обработки сигналов). Что касается ЦСП, то главное отличие его от традиционного компьютерного анализа данных заключается в высокой скорости и эффективности выполнения сложных функций цифровой обработки, таких, как фильтрация, анализ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и сжатие данных в реальном масштабе времени.

Термин «комбинированная обработка сигналов» подразумевает, что системой выполняется и аналоговая, и цифровая обработка сигнала. Такая система может быть реализована в виде печатной платы, гибридной интегральной схемы (ИС) или отдельного кристалла с интегрированными элементами. АЦП и ЦАП рассматриваются как устройства комбинированной обработки сигналов, так как в каждом из них реализованы и аналоговые, и цифровые функции.

Недавние успехи технологии создания микросхем с очень высокой степенью интеграции позволяют осуществлять комплексную (цифровую и аналоговую) обработку на одном кристалле. Сама природа ЦОС подразумевает, что эти функции могут быть выполнены в режиме реального масштаба времени.

### **2.1.4 Сравнение аналоговой и цифровой обработки сигналов**

Сегодняшний инженер стоит перед выбором надлежащей комбинации аналоговых и цифровых методов для решения задачи обработки сигналов. Невозможно обработать физические аналоговые сигналы, используя только цифровые методы, так как все преобразователи (микрофоны, термодпары, тензорезисторы, пьезоэлектрические кристаллы, головки накопителя на магнитных дисках и т.д.) являются аналоговыми устройствами. Поэтому некоторые виды сигналов требуют наличия цепей нормализации для дальнейшей обработки сигналов аналоговым или цифровым методом. В действительности цепи нормализации сигнала – это аналоговые процессоры, выполняющие такие функции, как усиление, накопление (в измерительных и предварительных (буферных) усилителях), обнаруже-

ние сигнала на фоне шума (высокоточными усилителями синфазного сигнала, уравнивателями и линейными приемниками), динамическое сжатие диапазона (логарифмическими усилителями, логарифмическими ЦАП и усилителями с программируемым коэффициентом усиления) и фильтрация (пассивная и активная).

Несколько методов реализации процесса обработки сигналов показано на рисунке 2.1. В верхней области рисунка изображен чисто аналоговый подход. В остальных областях изображена реализация ЦОС. Обратите внимание на то, что, как только выбрана ЦСП-технология, следующим решением должно быть определение местоположения АЦП в тракте обработки сигнала.

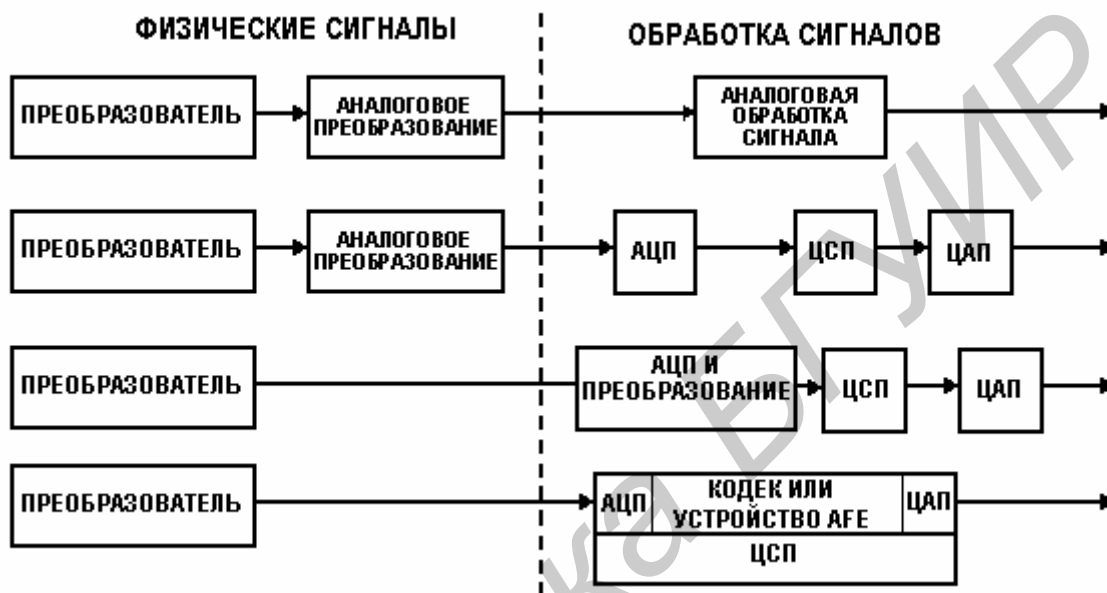


Рисунок 2.1 – Методы обработки аналоговых и цифровых сигналов

Вообще, поскольку АЦП перемещен ближе к преобразователю, большая часть обработки аналогового сигнала теперь производится с помощью АЦП. Увеличение возможностей АЦП может выражаться в увеличении частоты дискретизации, расширении динамического диапазона, повышении разрешающей способности, отсеке входного шума, использовании входной фильтрации и программируемых усилителей, наличии источников опорного напряжения на кристалле и т.д. Все упомянутые дополнения повышают функциональный уровень и упрощают систему. При наличии современных технологий производства ЦАП и АЦП с высокими частотами дискретизации и разрешающими способностями существенный прогресс достигнут в интеграции все большего числа цепей непосредственно в АЦП/ЦАП. В сфере измерений, например, существуют 24-битные АЦП со встроенными программируемыми усилителями, которые позволяют оцифровывать полномасштабные мостовые сигналы 10 мВ непосредственно, без последующей нормализации.

## 2.2 Линеаризация функций преобразования

Рассмотрим *понятие линейности*. Говорят, что система линейна в определенном диапазоне измеряемых величин, если ее чувствительность не зависит от значения измеряемой величины, т.е. остается постоянной. В диапазоне линейности характеристики преобразователя электрический сигнал во всех элементах измерительной цепи пропорционален значениям измеряемой величины, если все

другие устройства, связанные с преобразователями (мосты, усилители), также линейны. В таком случае значительно упрощается последующая обработка результатов измерений. Преимущество линейности столь бесспорно, что при нелинейности преобразователя целесообразно делать измерительную систему линейной, включая в нее устройства коррекции. Этот процесс называют линеаризацией; он направлен на то, чтобы сделать сигнал прямо пропорциональным изменениям измеряемой величины.

Существует ряд способов, позволяющих скорректировать нелинейность характеристики как самого преобразователя, так и измерительной схемы в целом, не допустив при этом отклонений от линейности преобразования в рабочем диапазоне изменения измеряемой величины, и в пределах допускаемой погрешности измерений полагать чувствительность неизменной.

Эти способы условно могут быть разбиты на две группы:

а) корректирующие характеристики преобразователя или схемы аппаратными средствами путем компенсации нелинейности;

б) корректирующие результаты измерений аналоговой или цифровой обработкой выходного сигнала аппаратными и (или) программными средствами.

Как видно из описания различных измерительных преобразователей, содержащегося в предыдущих частях учебного пособия, многие из них имеют нелинейную функцию преобразования. Значение параметра  $Y$  выходного сигнала, несущего информацию, у такого преобразователя нелинейно связано со значением измеряемой величины  $X$ . В то же время показание выходного прибора  $Z$  должно быть выражено в единицах  $X$ . У аналогового прибора можно добиться этого соответствующей нелинейной градуировкой шкалы. Если же используется цифровой прибор, то подводимые к нему цифровые сигналы должны выражать значения  $Z = X$ . Добиться этого при нелинейной связи

$$Y = f(X) \quad (2.1)$$

можно только обратным нелинейным преобразованием

$$Z = f^{-1}(Y). \quad (2.2)$$

Это и есть линеаризация функции преобразования. В системах встречаются преобразователи с различными видами нелинейных функций преобразования. Линеаризация выполняется либо специализированными блоками (индивидуальными или групповыми – для однотипных источников), либо общим устройством обработки информации.

Линеаризация требуется не только в связи с задачей цифрового воспроизведения измеряемых величин. Понятие нормализации сигналов в более общем виде включает не только приведение их к общему диапазону, но и получение одинаковой формы функциональной зависимости между параметром сигнала  $Y$  и измеряемыми величинами  $X$ . Тогда, например, одинаковую относительную ширину зоны нормальных значений для нескольких контролируемых величин можно задать одним общим сигналом (одной уставкой). Но если требуется одинаковая



форма зависимости  $Y(X)$ , то удобнее всего выбрать линейную форму. При этом упрощаются и другие виды обработки информации, в противном случае придется во всех вычислениях учитывать нелинейную связь между значениями  $Y$ , введенными в устройство обработки, и соответствующими значениями  $X$ .

### 2.2.1 Линеаризация характеристики преобразования

#### Коррекция нелинейности преобразователя

*Выбор линейного участка характеристики преобразователя.* Если функция преобразования (градуировочная характеристика) преобразователя имеет определенный линейный участок, а измеряемая величина изменяется относительно этого участка в таких же пределах, то, воздействуя на преобразователь определенным постоянным значением измеряемой величины, можно обеспечить изменения выходного сигнала преобразователя в границах данного линейного участка характеристики. Так, например, на модулированный световой поток  $\Phi_i(t)$ , воспринимаемый фототранзистором, может быть наложен постоянный световой поток  $\Phi_0$ , который выбирают таким, чтобы преобразование сигналов происходило в зоне линейности характеристики фототранзистора. Однако этот метод применим лишь при отсутствии постоянной составляющей в измеряемой величине, содержащей полезную информацию.

*Линеаризация изменений полного сопротивления преобразователя.* Этот метод часто применяется с термисторами (резистивными преобразователями температуры в электрическое сопротивление). Интерпретация измерительного сигнала, поступающего с выхода схемы формирования, существенно упрощается, если он изменяется линейно в зависимости от температуры. Наиболее простой метод линеаризации заключается в параллельном или последовательном подключении к преобразователю с сопротивлением  $R_{\Pi}(X)$  (в зависимости от конкретных условий) резистора с постоянным сопротивлением  $R_i$  (называемого линеаризующим резистором), не зависящим от измеряемой величины. Значение линеаризующего резистора  $R_i$  определяется из условия квазилинейной зависимости измеряемого напряжения  $U_X$  от температуры  $\theta$  вблизи выбранной температуры  $\theta_i$  (рисунок 2.2). Эта квазилинейная зависимость в действительности соответствует точке перегиба кривой  $U_X(\theta)$  при  $\theta = \theta_i$ , что выражается математическим условием

$$\left. \frac{d^2 U_X(\theta)}{d\theta^2} \right|_{\theta=\theta_i} = 0. \quad (2.3)$$

Вид функции  $U_X(\theta)$  зависит от типа преобразователя и схемы формирования сигнала, но для конкретного преобразования и определенной температуры  $\theta_i$  линеаризация обеспечивается при одном и том же значении сопротивления  $R_i$  независимо от вида схемы формирования сигнала – источника тока, потенциометрической схемы или измерительного моста.

*Дифференциальное включение двух нелинейных преобразователей.* В качестве иллюстрации этого метода рассмотрим одинаковые резистивные преобразователи, чувствительные к одной и той же измеряемой величине  $X$ , но изготовленные из разных материалов, так что зависимость их сопротивлений от измеряемой величины  $X$  описывается выражениями

$$R_1(X) = R_{01}(1 + A_1X + B_1X^2), \quad (2.4)$$

$$R_2(X) = R_{02}(1 + A_2X + B_2X^2). \quad (2.5)$$

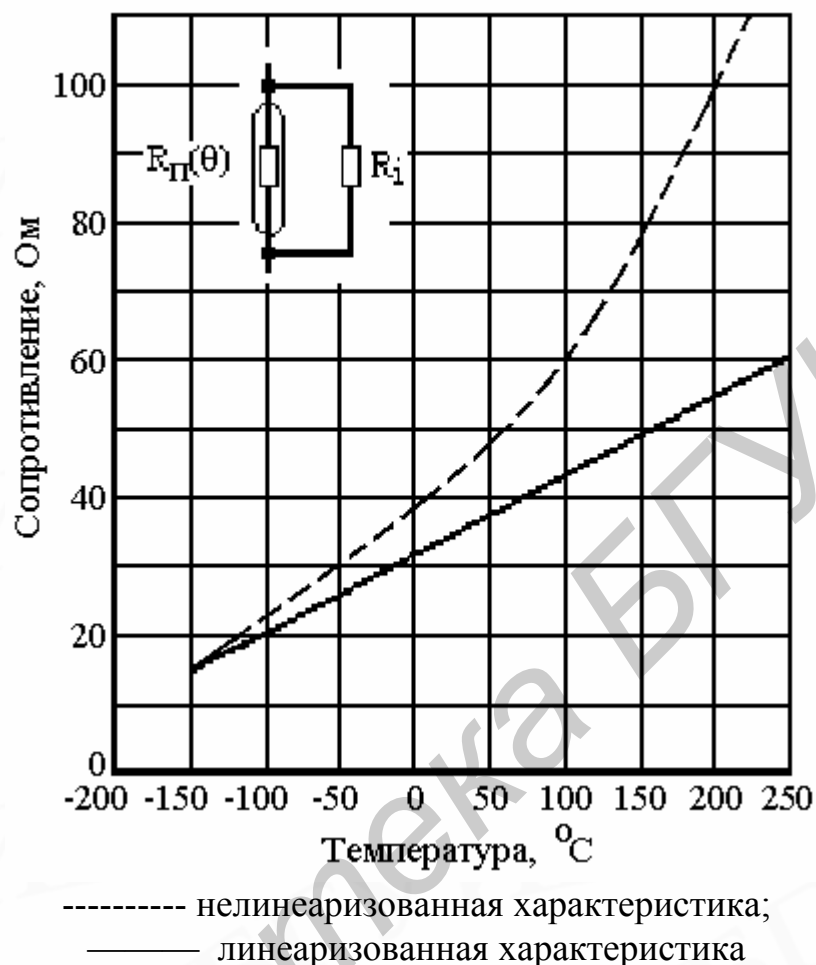


Рисунок 2.2 – Линеаризация характеристики никелевого зонда с сопротивлением 50 Ом вблизи температуры 25 °С при помощи шунта с сопротивлением 150 Ом

Встречное включение двух таких преобразователей образует сопротивление, изменяющееся в функции  $X$  линейно:

$$R(X) = (R_{01} + R_{02}) \left[ 1 + \frac{R_{01}A_1 + R_{02}A_2}{R_{01} + R_{02}} X \right] \quad (2.6)$$

при условии, что

$$\frac{R_{01}}{R_{02}} = \frac{B_2}{B_1}. \quad (2.7)$$

Этот метод находит применение, например, при работе с металлическими термометрами сопротивления.

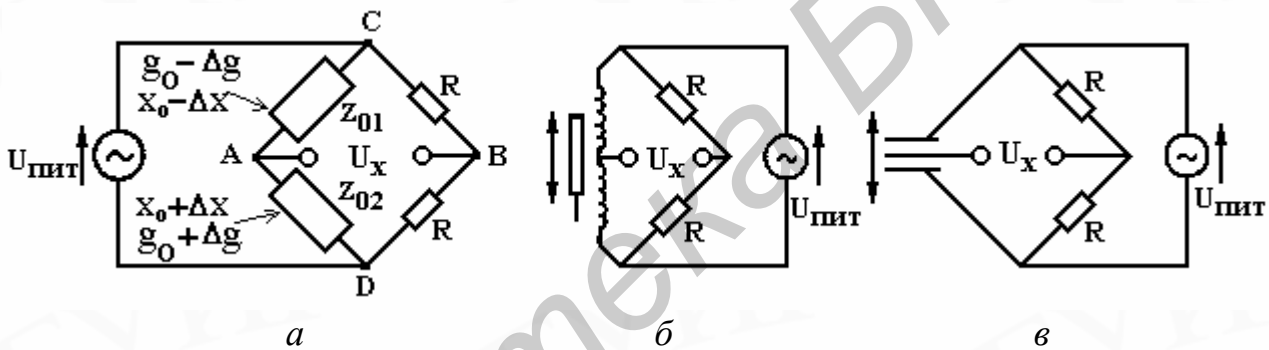
Линеаризация характеристики преобразования возможна и при дифференциальном включении двух одинаковых преобразователей с нелинейной функци-

ей преобразования в смежные плечи моста при воздействии на них одинаковых, но противоположных по знаку значений измеряемой величины.

Если два преобразователя с одинаковыми сопротивлениями включаются в смежные плечи моста, образуя дифференциальную схему, то в результате обеспечивается компенсация воздействия влияющих величин. А так как изменение измеряемой величины вызывает идентичные по значениям, но противоположные по знаку реакции преобразователей, то достигается улучшение линейности функции преобразования схемы в целом и линеаризация совокупной характеристики преобразователей в частности.

Принципиальные схемы мостов с дифференциальным включением преобразователей приведены на рисунке 2.3. При нелинейных функциях преобразования преобразователей (нелинейность, например, квадратичная) равные и противоположно направленные воздействия измеряемой величины вызывают изменения полных сопротивлений преобразователей, которые уже не являются одинаковыми по значению и противоположными по знаку, т.е.

$$\Delta Z_{\Pi 2} = \alpha \Delta X + \beta (\Delta X)^2 \quad \text{и} \quad \Delta Z_{\Pi 2} = \alpha (-\Delta X) + \beta (\Delta X)^2. \quad (2.8)$$



*a* – общая принципиальная схема;  
*б, в* – примеры схем с индуктивным и емкостным преобразователями

Рисунок 2.3 – Мостовые схемы с дифференциальным включением преобразователей

Напряжение разбаланса в этом случае выражается нелинейным соотношением

$$U_X = \frac{U_{\text{пит}}}{2} \frac{\alpha \Delta X}{Z_{\Pi 0}} \frac{1}{1 + \frac{\beta (\Delta X)^2}{Z_{\Pi 0}}}, \quad (2.9)$$

которое приводится к линейному виду

$$U_X = \frac{U_{\text{пит}}}{2} \frac{\alpha \Delta X}{Z_{\Pi 0}}, \quad \text{если} \quad \frac{\beta (\Delta X)^2}{Z_{\Pi 0}} \ll 1, \quad (2.10)$$

что обычно имеет место.

## 2.2.2 Коррекция нелинейности характеристики измерительной схемы с

## параметрическими преобразователями

Линеаризация характеристики мостовой схемы может осуществляться путем использования отрицательной обратной связи, воздействующей на напряжение разбаланса (рисунок 2.4).

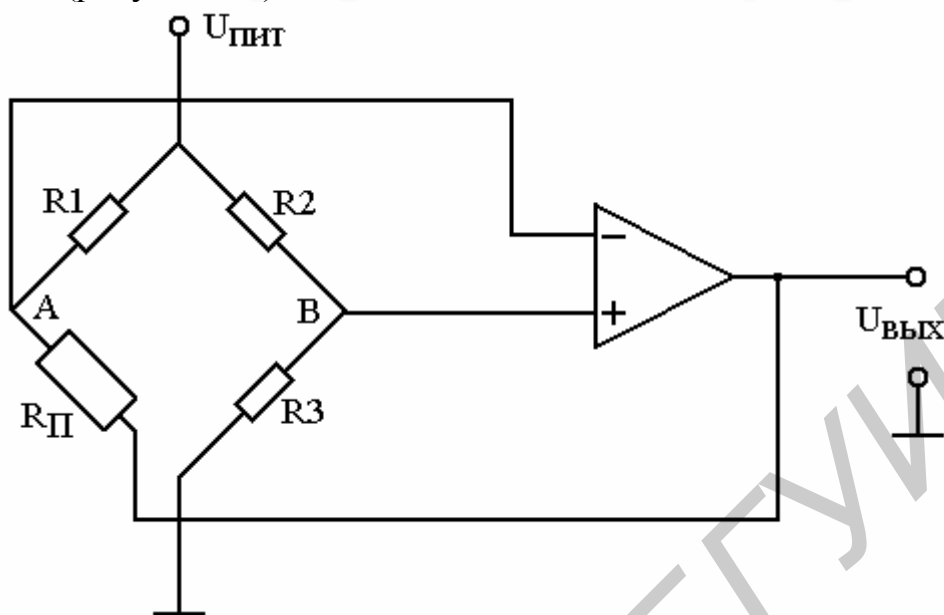


Рисунок 2.4 – Схема моста с линеаризацией характеристики путем применения отрицательной обратной связи

Преобразователь включается в цепь обратной связи усилителя. При начальном значении измеряемой величины  $X_0$  сопротивление преобразователя равно  $R_{\Pi 0}$ , а остальные сопротивления моста равны ему, т.е.  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{\Pi 0}$ .

Когда измеряемая величина изменяется, сопротивление преобразователя становится  $R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \Delta R_{\Pi}$ , а напряжение разбаланса

$$U_d = U_B - U_A, \quad (2.11)$$

где  $U_B = \frac{U_{\text{пит}}}{2}$ ;

$$U_A = \frac{R_{\Pi}}{R_{\Pi 0} + R_{\Pi}} U_{\text{пит}} + \frac{R_{\Pi 0}}{R_{\Pi 0} + R_{\Pi}} U_X.$$

Здесь  $U_X$  – напряжение на выходе усилителя.

Так как усилитель с отрицательной обратной связью поддерживает равной нулю разность потенциалов между точками диагонали моста, т.е.  $U_A = U_B$ , то

$$U_X = -\frac{U_{\text{пит}}}{2} \frac{\Delta R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}}. \quad (2.12)$$

С точностью до малых второго порядка значимости можно обеспечить компенсацию влияющей на результаты измерения величины, если использовать в качестве  $R_1$  преобразователь, идентичный основному измерительному преобразователю и подвергающийся такому же воздействию этой влияющей величины.

В подобной схеме преобразователи необходимо изолировать от корпуса, что часто оказывается невозможным.

Линеаризация характеристики мостовой схемы с использованием двойной обратной связи, воздействующей и на напряжение питания моста, показана на рисунке 2.5. Мост, как и в предыдущей схеме, образован плечами сопротивлений  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{\Pi 0}$ , а  $R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \Delta R_{\Pi}$ .

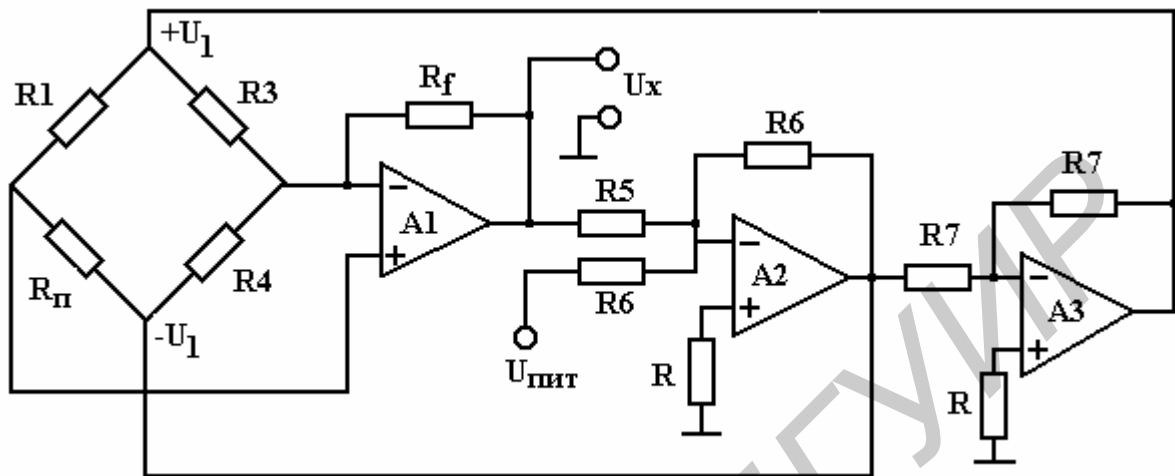


Рисунок 2.5 – Схема измерительного моста с линеаризацией функции преобразования двойной обратной связью

Отрицательная обратная связь в первом каскаде А1 действует в направлении разбаланса моста; равновесие наступает при

$$U_X = U_1 \frac{R_{\Pi 0} + 2R_f}{2R_{\Pi 0} + \Delta R_{\Pi}} \frac{\Delta R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}}. \quad (2.13)$$

Напряжение питания моста  $\pm U_1$  задают сумматор А2 и инвертор А3. При этом

$$|U_1| = U_{\text{пит}} \frac{R_6}{R_5} U_X. \quad (2.14)$$

Когда выполняется условие  $R_6/R_5 = R_{\Pi 0}/(R_{\Pi 0} + 2R_f)$ , преобразуемое напряжение определяется выражением

$$U_X = \frac{U_{\text{пит}}}{2} \left\{ 1 + \frac{2R_f}{R_{\Pi 0}} \right\} \frac{\Delta R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}}. \quad (2.15)$$

### 2.2.3 Коррекция погрешности нелинейности обработкой электрического сигнала – результата преобразования

*Нелинейное преобразование сигнала.* Выходное напряжение измерительного моста или потенциометрической схемы с симметричным питанием является нелинейной функцией изменений сопротивления преобразователя и определяется выражением

$$U_X = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{4} \frac{\Delta R_{\text{П}}}{R_{\text{П0}}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{\text{П}}}{2R_{\text{П0}}}}. \quad (2.16)$$

Схема, представленная на рисунке 2.6, позволяет нелинейным преобразованием напряжения  $U_X$  получить напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , которое является линейной функцией  $\Delta R_{\text{П}}$ . Напряжение на выходе умножителя напряжений

$$U_0 = \frac{U_X U_Y}{U_{\text{ОП}}} = \frac{U_X U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ОП}}}, \quad (2.17)$$

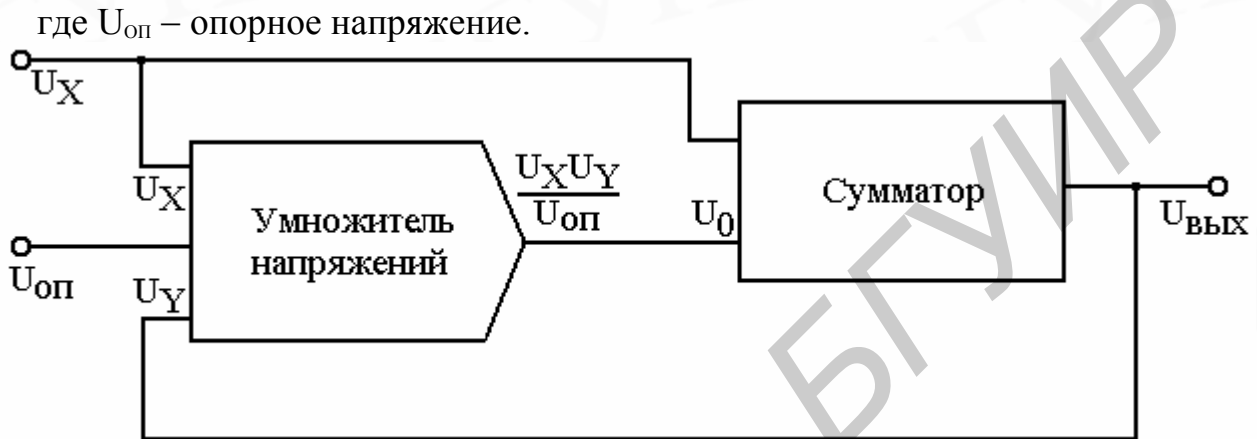


Рисунок 2.6 – Схема нелинейного преобразования измерительного сигнала с помощью умножителя напряжений

Коэффициенты усиления каналов умножителя равны соответственно  $a$  и  $b$ . Выходное напряжение сумматора, осуществляющего суммирование с учетом весовых коэффициентов, равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = aU_X + bU_0 = aU_X + b \frac{U_X U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ОП}}}, \quad (2.18)$$

откуда

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{aU_X}{1 - b \frac{U_X}{U_{\text{ОП}}}}. \quad (2.19)$$

Подставляя выражение  $U_X$  в (2.19), получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{aU_{\text{ПИТ}}}{4} \frac{\Delta R_{\text{П}}}{R_{\text{П0}}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{\text{П}}}{2R_{\text{П0}}} \left( 2 + \frac{b U_{\text{ПИТ}}}{2 U_{\text{ОП}}} \right)}. \quad (2.20)$$

Напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  становится линейной функцией  $\Delta R_{\text{П}}$  при равенстве единице третьего сомножителя, что достигается выбором коэффициента усиления  $b$ ,

а именно:  $b = 2 \frac{U_{\text{ОП}}}{U_{\text{ПИТ}}}$ .

Другая схема нелинейного преобразования результата измерения представлена на рисунке 2.7. Ее преимуществом является получение скорректированного результата  $U_{\text{ВЫХ}}$ , не зависящего от напряжения питания моста и, следовательно, от флуктуации этого напряжения.

Схема содержит инвертор и аналоговый делитель, напряжение на выходе которого относительно напряжений  $U_N$  и  $U_D$  на его входах равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = 10 \frac{U_N}{U_D}. \quad (2.21)$$

Напряжение на выходе инвертора равно

$$U_0 = -U_X = -\frac{U_{\text{ПИТ}}}{4} \frac{\Delta R_{\text{П}}}{R_{\text{П0}}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_{\text{П}}}{2R_{\text{П0}}}}. \quad (2.22)$$

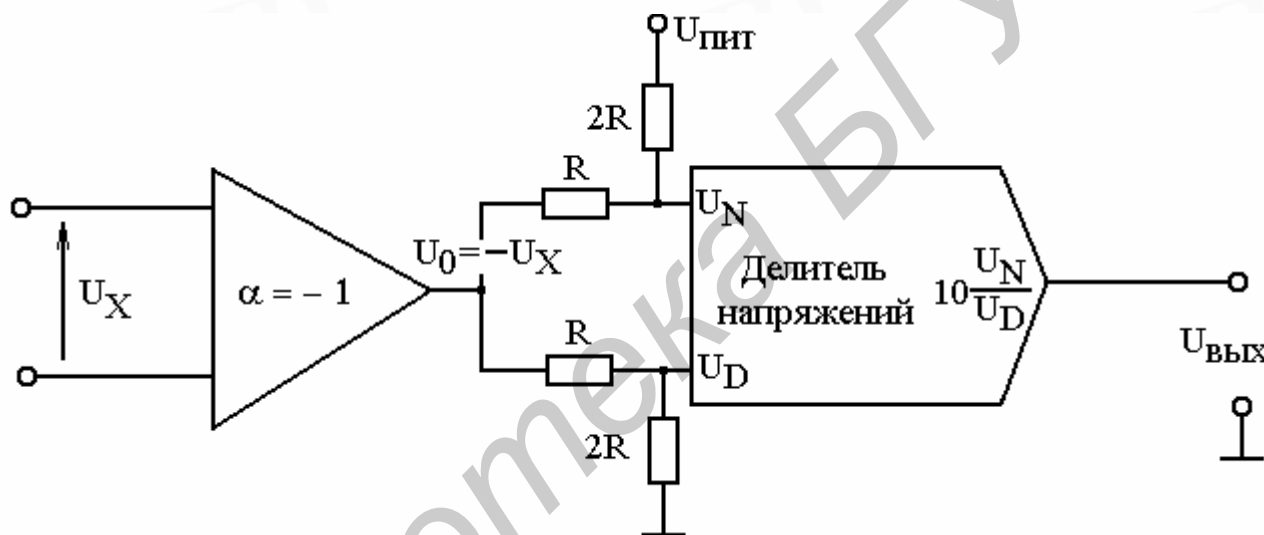


Рисунок 2.7 – Схема нелинейного преобразования измерительного сигнала с помощью делителя напряжений

Обозначая через  $R_i$  сопротивление каждого из входов делителя, получим

$$U_N = \frac{2R_i}{3R_i + 2R} U_0 \quad \text{и} \quad U_D = \frac{2R_i}{3R_i + 2R} \left( \frac{U_{\text{ПИТ}}}{2} + U_0 \right). \quad (2.23)$$

Таким образом, окончательно имеем

$$U_{\text{ВЫХ}} = 10 \frac{U_N}{U_D} = -10 \frac{\Delta R_{\text{П}}}{R_{\text{П0}}}. \quad (2.24)$$

#### 2.2.4 Коррекция результатов преобразований введением поправок

*Аппроксимация характеристики.* Градуировочную характеристику, отражающую связь величин  $U_X$  и  $X$ , можно аппроксимировать многочленом  $n$ -й степени:

$$X = a_0 + a_1 U_X + a_2 U_X^2 + \dots + a_n U_X^n. \quad (2.25)$$

Значения  $(n + 1)$  постоянных коэффициентов  $a_k$  можно получить, решая  $n + 1$  уравнений, связывающих  $(n + 1)$  значений  $U_X$  и  $X$ . Такой способ нахождения значений  $a_k$  не обеспечивает наилучшего и единственного решения, поскольку оно будет зависеть от выбора числа точек аппроксимации. Очевидно, для упрощения решения следует ограничить число членов до приемлемого минимума, определяемого задаваемой погрешностью измерений.

Устройство линеаризации зависимости  $U_X(X)$  должно формировать напряжение, пропорциональное значению величины  $X$

$$U_{\text{ВЫХ}} = AX, \quad (2.26)$$

т.е.

$$U_{\text{ВЫХ}} = A(a_0 + a_1U_X + a_2U_X^2 + \dots + a_nU_X^n), \quad (2.27)$$

или, обозначая  $A_k = Aa_k$  ( $k = 0, n$ ),

$$U_{\text{ВЫХ}} = A_0 + A_1U_X + A_2U_X^2 + \dots + A_nU_X^n. \quad (2.28)$$

Таким образом, линеаризирующее устройство можно создать, сочетая умножители, формирующие значения  $U_X^k$ , и сумматоры, осуществляющие их сложение с учетом весовых коэффициентов.

На рисунке 2.8 показано аналоговое устройство линеаризации, аппроксимирующее выходную функцию (сигнал) многочленом четвертой степени:

$$U_{\text{ВЫХ}} = A_0 + A_1U_X + A_2U_X^2 + A_3U_X^3 + A_4U_X^4. \quad (2.29)$$

В соответствии с теоремой Мильмана получаем следующие зависимости членов  $A_k$  относительно проводимостей  $Y_i = \frac{1}{R_i}$  для данной схемы:

$$\begin{aligned} A_0 &= -\frac{Y_6}{Y}, & A_1 &= \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \frac{Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y}{Y}, \\ A_2 &= -\frac{Y_5}{Y}, & A_3 &= \frac{10^{-2} Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \frac{Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y}{Y}, \\ A_4 &= -10^{-3} \frac{Y_4}{Y}. \end{aligned} \quad (2.30)$$



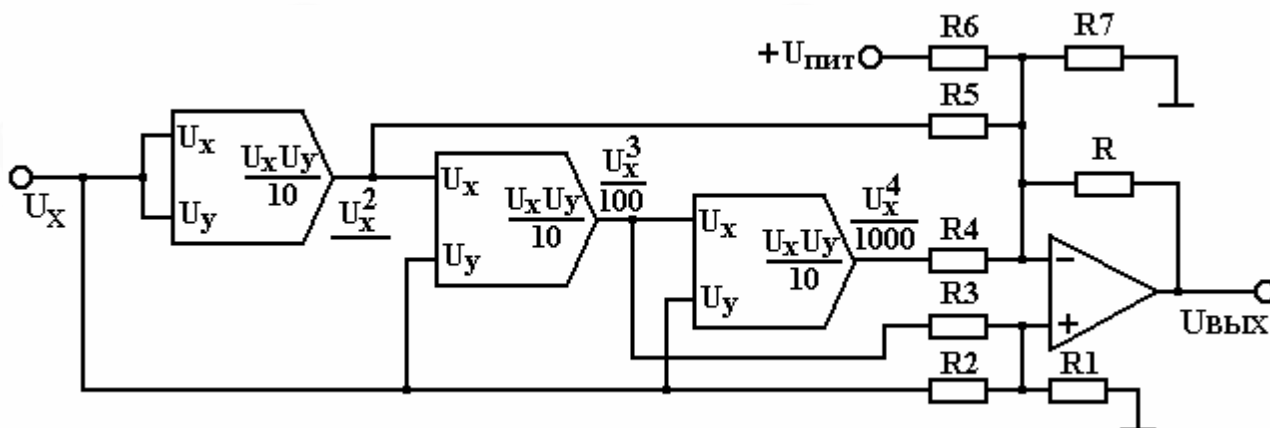


Рисунок 2.8 – Схема аппроксимации измерительного сигнала многочленом четвертой степени

**Пример.** На основании градуировочной характеристики термопары хромель – константан получено соотношение, которое в диапазоне от минус 100 до до плюс 900 °С с погрешностью не хуже 3 °С отражает зависимость температуры  $\theta$  (°С) на измерительном спаяе (температура опорного спая 0 °С) от выдаваемой термопарой термоЭДС  $e$  в милливольтгах:

$$\theta = -2,69309 + 17,2024e - 0,186021e^2 + 0,00295744e^3 - 0,0000163000e^4.$$

Устройство аппроксимации, приведенное на рисунке 2.8, формирует на выходе напряжение  $U_{\theta}$ , которое численно равно температуре  $\theta$  при напряжении питания  $E = 10$  В и следующих номиналах резисторов, кОм:

$$\begin{aligned} R1 &= 10,00; R2 = 1,340; R3 = 77,97; \\ R4 &= 613,5; R5 = 5,376; R6 = 37,13; \\ R7 &= 0,6000; R = 10,00. \end{aligned}$$

Если градуировочная характеристика аппроксимируется многочленом степени  $n > 2$ , то более целесообразно применение многофункциональной схемы. Таковая реализована, например, в микросхеме AD433 (изготовитель – фирма Analog Devices), к входам которой прилагаются напряжения  $U_x, U_y, U_z$ , а на выходе формируется напряжение, пропорциональное величине  $U_y(U_z/U_x)^n$ , где  $n$  регулируется выбором соотношения сопротивлений (рисунок 2.9).

Если функция  $X = f(U_x)$  имеет линейный участок, который заключен между нелинейными участками, то применяют схему ограниченной линеаризации.

Так, например, если для  $U_x > U_{x1}$  участок характеристики линеен, т.е.  $X = a_0 + a_1 U_x$ , то напряжение  $U_{\text{вых}}$  на выходе сумматора

$$U_{\text{вых}} = A_x = A_0 + A_1 X. \tag{2.31}$$

Если при  $U_x < U_{x1}$  характеристика преобразователя нелинейна и отклонение от предшествующей линейной части нарастает в соответствии с разностью  $U_{x1} -$

$U_X$ , то вводимые для коррекции члены должны также соответствовать значениям функции  $U_{X1} - U_X$ , т.е.

$$X = a_0 + a_1 U_X + \sum_1^n a_k (U_{X1} - U_X)^k. \quad (2.32)$$

Устройство линеаризации должно формировать в этом случае напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = AX = A_0 + A_1 U_X + \sum_1^n A_k (U_{X1} - U_X)^k. \quad (2.33)$$

Такое устройство должно состоять из одного или нескольких сумматоров, осуществляющих сложение с учетом весовых коэффициентов, пороговой схемы, напряжение  $U$  на выходе которой равно нулю для  $U_X > U_{X1}$  и пропорционально разности  $U_{X1} - U_X$ , когда  $U_X < U_{X1}$ , а также множително-делительной (многофункциональной) схемы, к входу которой приложено напряжение  $U$  от пороговой схемы. Схема такого устройства представлена на рисунке 2.9.

На его выходе формируется напряжение:

$$\text{при } U_X > U_{X1} \quad U_{\text{ВЫХ}} = A_0 + A_1 U_X;$$

$$\text{при } U_X < U_{X1} \quad U_{\text{ВЫХ}} = A_0 + A_1 U_X + A'_1 (U_{X1} - U_X) + A'_n (U_{X1} - U_X)^n.$$

В функции параметров элементов устройства напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  выражается соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R}{R1} 10 + \frac{R}{R2} U_X - \frac{R}{R3} U - \frac{R}{R4} 10 \left( \frac{U}{10} \right)^n. \quad (2.34)$$

При  $U = 0$  для случая  $U_X > U_{X1}$  имеем

$$U_{X1} = 10 \frac{R}{R6}, \quad (2.35)$$

а для  $U_X < U_{X1}$

$$U = \frac{R5}{R} (U_{X1} - U_X). \quad (2.36)$$

Таким образом, условия линеаризации обеспечиваются надлежащим выбором номиналов компонентов измерительной цепи.

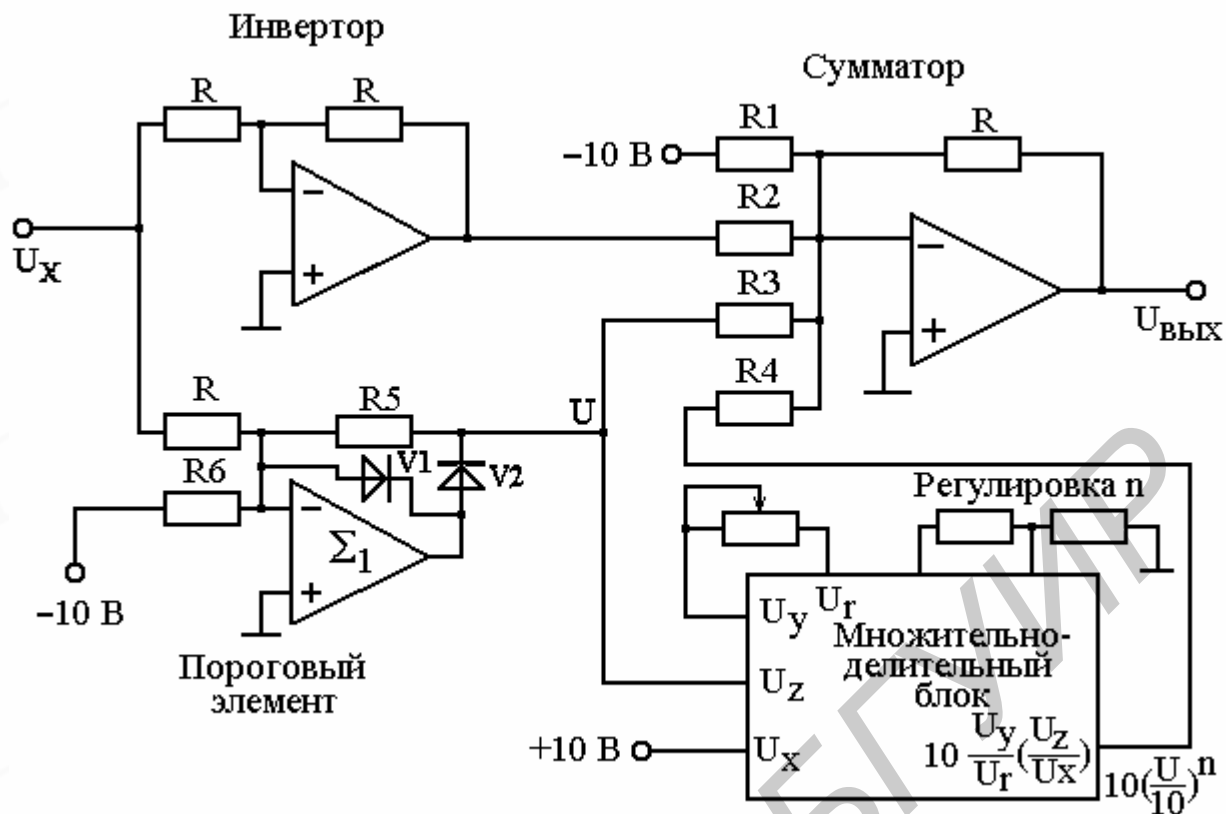


Рисунок 2.9 – Схема аппроксимации измерительного сигнала, описываемого частично нелинейной функцией

Линеаризация градуировочной характеристики разбиением ее на участки. В общем случае кривая  $X = f(U_X)$  может быть разбита на конечное число  $i$  участков (рисунок 2.10), каждый из которых может быть аппроксимирован двучленом первой степени:

$$X = a_i + b_i U_X. \quad (2.37)$$

При разбиении кривой на четыре участка, как показано на рисунке 2.10, справедливы соотношения

$$\begin{aligned} X &= a_3 + b_3 U_X && \text{для } U_X > U_{X3}; \\ X &= a_2 + b_2 U_X && \text{для } U_{X2} < U_X < U_{X3}; \\ X &= a_1 + b_1 U_X && \text{для } U_{X1} < U_X < U_{X2}; \\ X &= a_0 + b_0 U_X && \text{для } U_X < U_{X1}. \end{aligned}$$

Каждый раз, когда текущее значение  $U_X$  переходит границу того или иного участка, значение напряжения  $U_{\text{ВЫХ}} = AX$  изменяется соответственно наклону данного участка кривой. Это осуществляется с помощью сумматоров, пороги которых соответствуют различным границам  $U_{Xi}$ , и каждый из которых выдает напряжение  $U_i$ , равное нулю или пропорциональное  $U_{Xi} - U_X$  в зависимости от того, превосходит или нет значение  $U_X$  порог сумматора.

На рисунке 2.11 представлено аппроксимирующее устройство, позволяющее осуществить линеаризацию функции, разбитой на четыре участка (см. рисунок 2.10). Выходное напряжение устройства имеет форму

$$U_{\text{ВЫХ}} = A_i + B_i U_X \quad \text{для} \quad U_{X_i} < U_X < U_{X_{i+1}}, \quad (2.38)$$

где  $A_i = A a_i$  и  $B_i = A b_i$ .

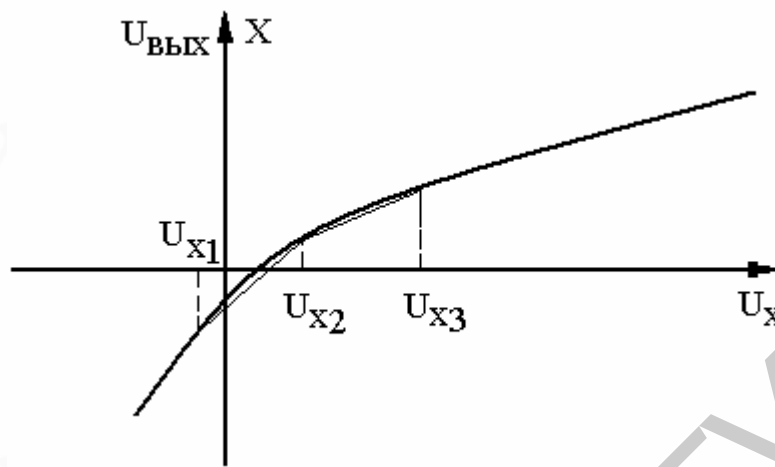


Рисунок 2.10 – Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной функции.  
 Диаграмма аппроксимации кривой

Если границы участков задать в соответствии со значениями

$$\frac{10R}{R7} = U_{X3}, \quad \frac{10R}{R6} = U_{X2}, \quad \frac{10R}{R5} = U_{X1}, \quad (2.39)$$

то напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  на выходе устройства будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R}{R0} 10 + \frac{R}{R4} U_X + \frac{R}{R3} U_3 + \frac{R}{R2} U_2 + \frac{R}{R1} U_1. \quad (2.40)$$

Значения  $U$  в различных случаях составят:

при $U_X > U_{X3}$	$U_3 = U_2 = U_1 = 0;$
при $U_{X2} < U_X < U_{X3}$	$U_3 = U_{X3} - U_X, U_2 = U_1 = 0;$
при $U_{X1} < U_X < U_{X2}$	$U_3 = U_{X3} - U_X, U_2 = U_{X2} - U_X, U_1 = 0;$
при $U_X < U_{X1}$	$U_3 = U_{X2} - U_X, U_2 = U_{X2} - U_X, U_1 = U_{X1} - U_X.$

Требуемые номиналы элементов схемы определяются из следующих соотношений:

$$\frac{10R}{R_0} = A_3, \quad \frac{R}{R_4} = B_2, \quad \frac{R}{R_3} = B_2 - B_3, \quad \frac{R}{R_2} = B_2 - B_1, \quad \frac{R}{R_1} = B_1 - B_0.$$

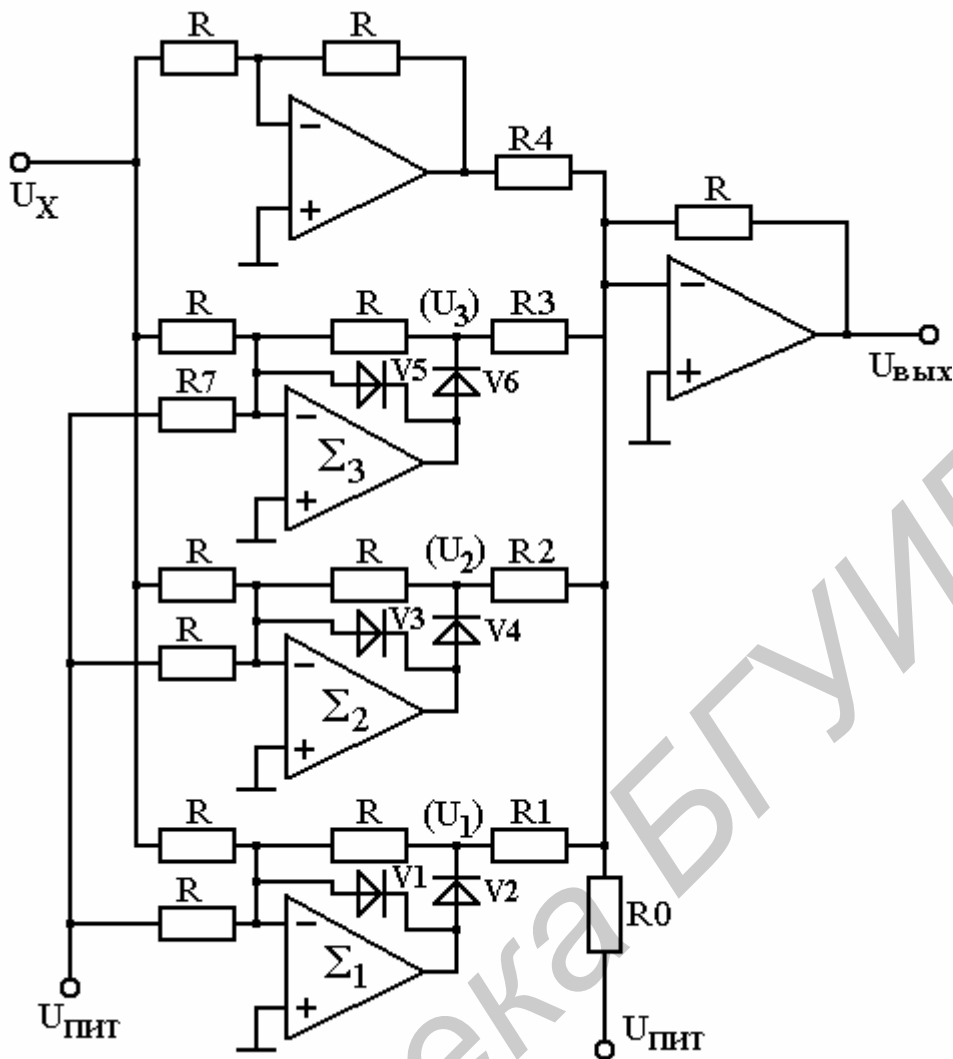


Рисунок 2.11 – Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной функции.  
Принципиальная схема аппроксиматора сигнала

### 2.2.5 Цифровые методы линеаризации

Использование цифровых методов линеаризации требует, чтобы измеряемое напряжение  $U_X$  было предварительно преобразовано в цифровую форму.

Цифровая система обработки данных (например ЭВМ) позволяет осуществить линеаризацию функции преобразования по специально разработанной программе, которая производит обработку измерительной информации с определенной скоростью.

В этом случае нелинейную функцию преобразования  $U_1 = f(U_X)$  разбивают на определенное число участков (рисунок 2.12) и абсциссы границ этих участков записывают в память ЭВМ.

Измеряемое напряжение  $U_X$  сравнивается с этим набором абсцисс:  $U_{X_i}$ ,  $U_X$ ,  $U_{X_{i+1}}$ . Когда таким образом определяется номер  $i$  участка, запускается программа для расчета  $U_{\text{ВЫХ}}$  по алгоритму линейно-кусочной аппроксимации:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}_{i+1}} - U_{\text{ВЫХ}_i}}{U_{X_{i+1}} - U_{X_i}} (U_X - U_{X_i}) + U_{\text{ВЫХ}_i} \quad (2.41)$$

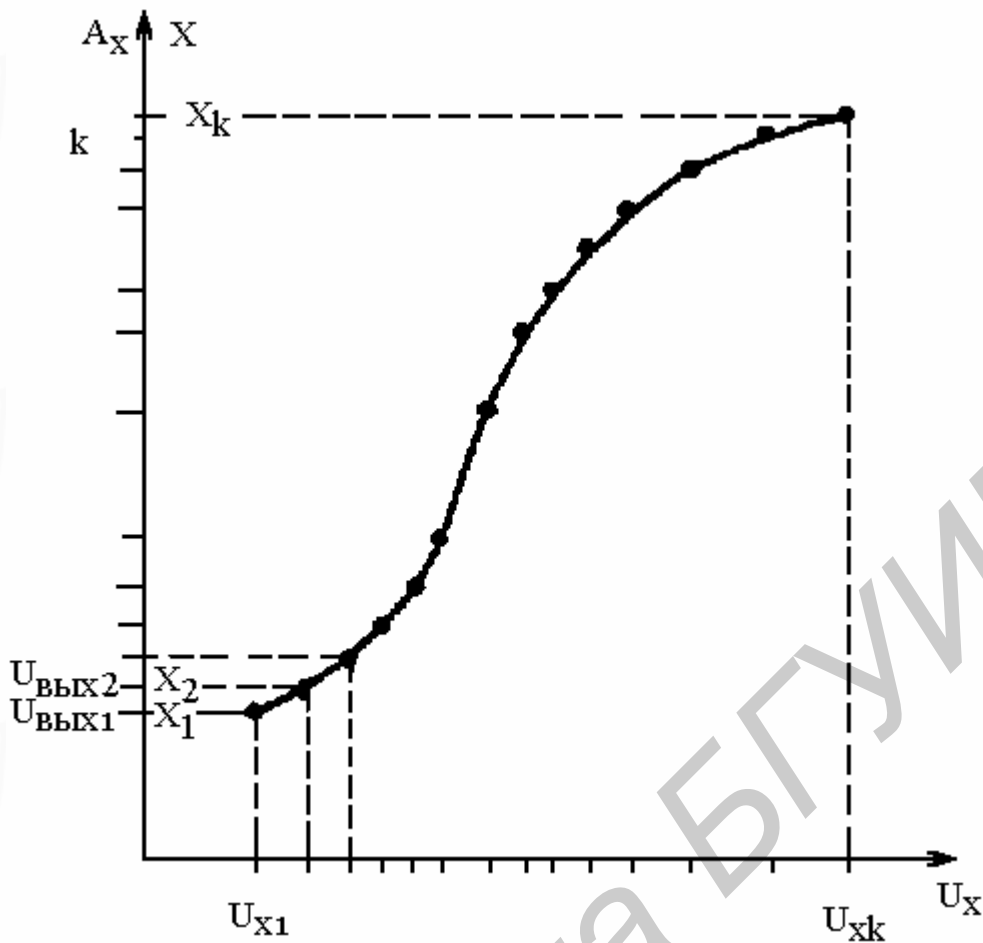


Рисунок 2.12 – Кусочно-линейная аппроксимация функции при использовании цифрового метода обработки данных

Постоянные коэффициенты, определяющие наклон прямых каждого из участков, должны также храниться в памяти. При такой последовательной обработке данных необходимо учитывать время проведения операций, позволяющее получать результаты с требуемой скоростью.

### 2.3 Нормирование измерительной информации

#### 2.3.1 Нормирование диапазонов сигналов преобразователей

Этот вид обработки необходим в связи с тем, что в большинстве преобразовательных схем используются общие блоки и узлы (например аналого-цифровой преобразователь), рассчитанные на один общий диапазон входных сигналов. В то же время преобразователи имеют выходные сигналы, различающиеся не только по диапазонам, но в ряде случаев и по видам носителей и модулируемых параметров этих носителей.

Приведение всех указанных сигналов к сигналу одного вида и диапазона выполняется обычно отдельными схемами или блоками. Существуют элементы нормирования либо индивидуальные для каждого канала измерения, либо групповые, обрабатывающие поочередно сигналы от нескольких преобразователей одного типа. Групповые блоки нормирования имеют на входе переключатель (коммутатор), поочередно подключающий источники сигналов.

#### 2.3.2 Нормирующие преобразователи

На рисунке 2.13 показаны примеры структурных схем наиболее распространенных типов нормализующих преобразователей: для термопар; для термометров сопротивления; для дифференциально-трансформаторных преобразователей. Все они выдают сигнал постоянного напряжения  $U_{\equiv}$  с унифицированным диапазоном (например от 0 до 10 В).

Схема для термопар (рисунок 2.13,а) включает элемент компенсации температуры холодного спая (ЭК), усилитель постоянного тока (УПТ) и элемент линеаризации (ЭЛ). Последний может отсутствовать, если функция линеаризации выполняется общим устройством обработки информации.

Схема для термометров сопротивления (рисунок 2.13,б) включает мост (М), одним из плеч которого служит терморезистор  $R_T$ , и усилитель постоянного тока (УПТ).

Схема для дифференциально-трансформаторных датчиков (рисунок 2.13,в) содержит усилитель переменного тока (У) и фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ).

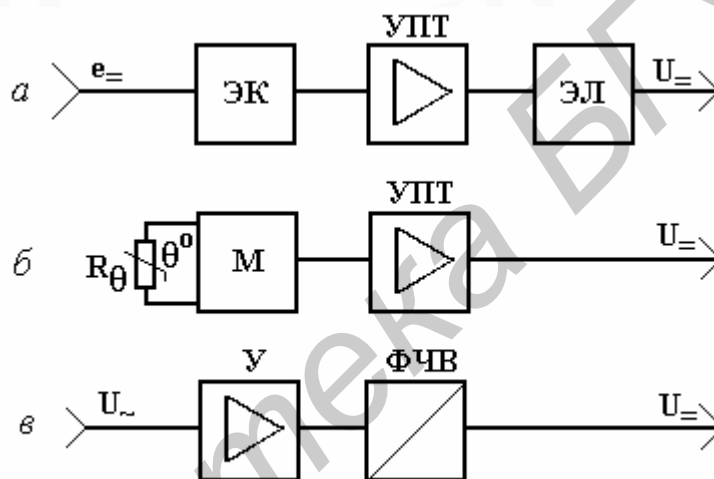


Рисунок 2.13 – Структурные схемы нормирующих преобразователей

Нормирующие преобразователи могут быть индивидуальными и групповыми.

### 2.3.3 Масштабирование

Этот термин получил применение по отношению к операции приведения диапазона значений чисел  $N$ , подаваемых на устройство цифрового воспроизведения, к диапазону значений воспроизводимой величины  $X$  в принятых для нее единицах измерения. В многоканальной системе сигналы от разных источников приводятся к одному диапазону на входе общего АЦП. Поэтому числа  $N_0$  на его выходе пропорциональны соответствующим значениям  $X$ , но не равны им. Их требуется умножать на индивидуальные масштабные коэффициенты. Масштабирование выполняется в измерительных системах либо специализированным блоком, либо общим устройством обработки информации.

Если в данном информационном канале присутствуют измерительные преобразователи с нелинейной функцией преобразования, операция масштабирования должна предшествовать операции линеаризации.

Масштабирование часто приходится совмещать с операцией смещения диа-

пазона шкалы. Например,  $X$  представляет собой температуру, диапазон значений которой изменяется от 250 до 1 000 °С, а этому диапазону соответствуют сигналы от 0 до 10 В на входе АЦП и числа  $N_0$  от 0 до 1 000 на его выходе. Тогда масштабирование заключается в вычислении  $N$  по формуле

$$N = 250 + 0,75N_0. \quad (2.42)$$

## **2.4 Обработка сигналов измерительной информации**

### **2.4.1 Преобразование цифровых сигналов из одной системы счисления в другую**

Этот вид обработки требуется в связи с тем, что для разных задач удобно выражать цифровую информацию в разных системах счисления. Для математических вычислений, передачи по каналам связи и хранения удобнее всего двоичный код. Для управления устройствами цифрового воспроизведения (показывающими и регистрирующими) требуется единично-десятичный код. Кроме того, многие источники информации выдают ее в цифровой форме и при этом не всегда в одной и той же системе счисления. Это же относится к некоторым получателям информации, например к цифровым регуляторам.

Преобразования кодов могут выполняться либо специализированными блоками (шифраторами, дешифраторами), либо общим устройством обработки информации.

### **2.4.2 Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно**

Первый из этих видов обработки нужен по ряду причин:

а) человеку удобно получать результаты измерений в виде чисел, воспроизводимых цифровыми указывающими и регистрирующими приборами; такие результаты объективнее и точнее результатов, читаемых человеком на шкалах аналоговых приборов;

б) большая часть разнообразных задач обработки информации, рассматриваемых ниже, решается в современных системах средствами цифровой вычислительной техники;

в) хранить результаты измерений проще в цифровой форме;

г) передача информации по каналам связи наиболее устойчива к воздействию помех при использовании цифровых (кодоимпульсных) сигналов.

Обратное преобразование (цифровых сигналов в аналоговые) требуется в тех случаях, когда результаты измерений или обработки информации нужно воспроизвести в графической форме либо подать на вход аналогового регулятора исполнительного механизма непрерывного действия. Наконец, в преобразователях аналогового сигнала в цифровой часто используются блоки отрицательной обратной связи, преобразующие выходное число в аналоговый сигнал для сравнения его с входным сигналом.

### **2.4.3 Вычисление результатов косвенных, совокупных и совместных измерений**

Эта задача возникает в тех случаях, когда некоторые физические величины не удастся измерить прямым методом с помощью измерительных преобразова-





саторов, дросселей, трансформаторов) может оказаться затруднительной, особенно когда требуется получить сравнительно малое значение верхней граничной частоты, например сотые доли герца.

Действие фильтра может быть заменено определенной математической обработкой функции времени, выражаемой входным суммарным сигналом:

$$U_{\Sigma}(t) = U(t) + S(t). \quad (2.47)$$

Один из видов такой обработки – это вычисление текущего среднего значения по формуле

$$U_{CP}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t U_{\Sigma}(\tau) d(\tau). \quad (2.48)$$

При этом обязательно выполнение следующего условия: период верхней частотной составляющей спектра сигнала  $U(t)$  должен в несколько раз превышать период исследуемого сигнала. Если одновременно оказывается, что период нижней частотной составляющей спектра помехи  $S(t)$  в несколько раз меньше периода полезного сигнала, то результат интегрирования достаточно точно повторяет форму сигнала  $U(t)$ . Если соблюдается первое условие, а второе не соблюдается, то помеха подавляется частично.

Интегрирование по (2.48) означает, что в момент  $t$  вместо ординаты  $U_{\Sigma}(t)$  выдается среднее значение  $u_{\Sigma}$ , найденное по интервалу шириной  $T$ , от  $t - T$  до  $t$ , т.е. площадь заштрихованного участка на рисунке 2.14,а, деленная на  $T$ . С течением времени  $t$  интервал усреднения непрерывно скользит вправо, сохраняя ту же ширину  $T$  (см. пунктирные границы на той же диаграмме для нового момента времени  $t_1$ ).

При вычислении интеграла (2.48) на ЭВМ непрерывная функция  $U_{\Sigma}(t)$  заменяется последовательностью дискретных ординат, взятых через интервал  $\theta$  (рисунк 2.14,б). Обозначим  $u_i$  ординату, соответствующую текущему значению времени  $t$ . Тогда ближайшая предшествующая ордината обозначается  $U_{i-1}$ , ей предшествует  $U_{i-2}$  и т.д. Предположим, в интервал  $T$  умещается  $n$  интервалов  $\theta$ . Тогда интеграл (2.48) заменяется суммой

$$U_i^* = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n U_{i-k}. \quad (2.49)$$

Со сдвигом на очередной шаг  $\theta$  в сумму вовлекается следующая ордината функции  $U_{\Sigma}(t)$ , но исключается ордината, которая в (5.54) обозначена  $U_{i-n}$ .

Известен и широко применяется другой вариант сглаживания, требующий меньшего объема памяти. Сущность его заключается в том, что при получении очередной ординаты сглаживаемой функции  $u_i$  выполняется операция

$$U_i^* = qU_{i-1}^* + (1-q)U_i, \quad (2.50)$$

где  $U_i^*$  – результат сглаживания на очередном шаге;  
 $U_{i-1}^*$  – результат сглаживания на предыдущем шаге;  
 $q$  – коэффициент, меньший 1.

Это означает усреднение, при котором вес каждой ординаты функции  $U_{\Sigma}(t)$  уменьшается по мере ее удаления в прошлое от текущего момента  $t$ . При этом быстрота уменьшения веса прошлых ординат задается значением  $q$ .

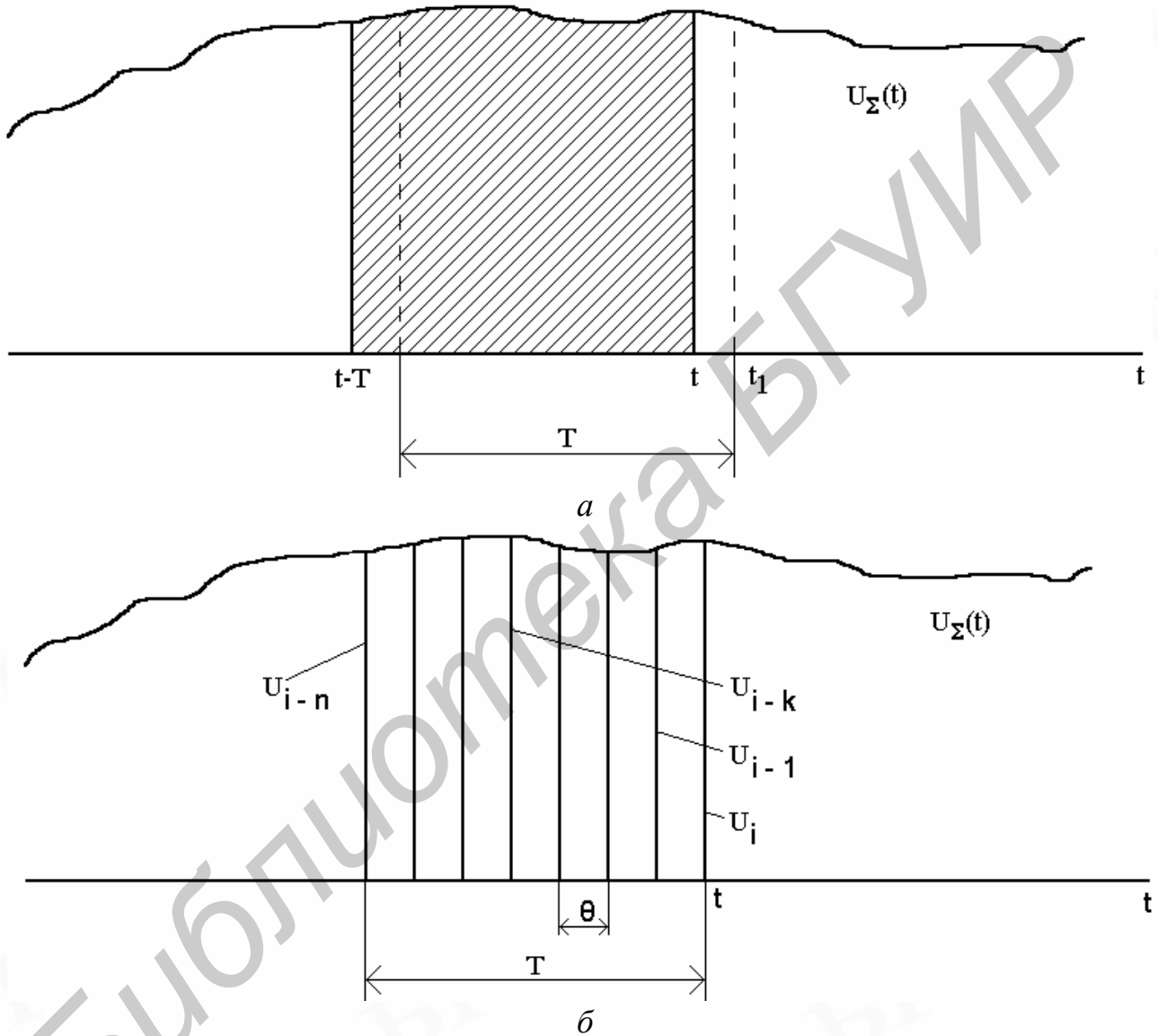


Рисунок 2.14 – Сглаживание данных

Рекуррентное соотношение (2.50) преобразуется в выражение

$$U_i^* = (1 - q)(U_i + qU_{i-1} + q^2U_{i-2} + \dots + q^nU_{i-n} + \dots). \quad (2.51)$$

Легко убедиться, что если  $U_{\Sigma}$  в течение длительного времени равно постоянной величине  $U_0$ , то

$$U_i^* = (1 - q)U_0(1 + q + q^2 \dots). \quad (2.52)$$

Выражение в скобках справа представляет собой сумму членов убывающей

геометрической прогрессии, стремящуюся при возрастании числа членов к значению  $1/(1-q)$ . Следовательно, результат сглаживания в этом случае будет стремиться к  $U(t)$ . Если максимальная скорость изменения  $U(t)$  такова, что изменение и за несколько шагов  $\theta$  не превышает допустимой погрешности измерения, то рассматриваемое сглаживание не исказит существенно функцию  $U(t)$ . В то же время более быстрые помехи  $S(t)$ , входящие в состав суммарного сигнала  $U_{\Sigma}(t)$ , будут в значительной мере сглажены, поскольку от каждого приращения  $U_{\Sigma}$  за один шаг  $\theta$  в выходной сигнал  $U_i^*$  входит относительно малая часть, определяемая коэффициентом  $1 - q$ .

Для закона убывания коэффициентов  $q, q^2, q^3 \dots$  при членах ряда (2.52) всегда можно подобрать экспоненциальную функцию  $e^{-a\theta}$  из условия, что за время, равное шагу дискретизации  $\theta$ , она должна уменьшиться до значения  $q$ :

$$e^{-a\theta} = q.$$

Отсюда

$$a = \frac{1}{\theta} \cdot \ln \frac{1}{q}.$$

Благодаря убыванию значений коэффициентов ряда по экспоненциальному закону рассматриваемому методу обработки информации присвоено название экспоненциального сглаживания. Он экономичен в отношении требуемого объема оперативной памяти ЭВМ: в ней нужно хранить только последнее значение результата сглаживания.

#### 2.4.5 Статистическая обработка результатов измерений с целью повышения точности

Погрешность измерений представляет собой обычно случайную величину. Во многих случаях математическое ожидание (т.е. среднее значение) погрешности равно нулю. Если заранее известно, что это условие соблюдается, то можно повысить точность, измеряя  $n$  раз данную величину  $X$  и вычисляя затем среднее из результатов измерений  $X_1, \dots, X_n$ :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2.53)$$

При этом погрешность  $\bar{X}$  остается случайной величиной, но ее дисперсия в  $n$  раз меньше дисперсии погрешности отдельных измерений  $X$ :

$$D(\Delta \bar{X}) = \frac{D(\Delta X)}{n}, \quad (2.54)$$

где  $\Delta X$  – случайная погрешность отдельного измерения  $X$ ;

$\Delta \bar{X}$  – случайная погрешность определения среднего значения  $\bar{X}$ ;

$D(\Delta X), D(\Delta \bar{X})$  – дисперсии этих погрешностей.

Следовательно, среднеквадратическое значение погрешности, равное корню квадратному из дисперсии, уменьшается в результате описанной обработки в

$\sqrt{n}$  раз.

Если математическое ожидание погрешности  $M(\Delta x) \neq 0$ , но значение его известно из предыдущих статистических исследований характеристик данного измерительного прибора, то можно выполнять аналогичную обработку, вычитая предварительно из каждого результата измерений  $X_i$  значение  $M(\Delta X)$ :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_i - M(\Delta X)]. \quad (2.55)$$

Известны и другие способы статистической обработки результатов измерений с целью повышения точности.

#### 2.4.6 Вычисление статистических характеристик измеряемых величин

Измеряемая величина  $X$ , как правило, тоже случайна. В ряде случаев при исследовании тех или иных объектов возникает задача определения не отдельных случайных значений  $X$ , а их статистических характеристик с целью последующего использования в расчетах, в прогнозировании и планировании.

В число таких статистических характеристик входят:

- а) плотность распределения  $f(X)$  или интегральная функция распределения  $F(x)$  (эти две характеристики взаимно однозначно связаны);
- б) математическое ожидание (среднее значение)  $M(X)$ ;
- в) дисперсия (среднее значение квадрата отклонения от математического ожидания)  $D(x)$  или среднеквадратическое отклонение  $\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$ .

Математическое ожидание и дисперсию называют соответственно первым и вторым моментами распределения  $f(X)$ . Иногда бывает нужно определять и моменты более высоких порядков.

В ряде случаев несколько параметров, характеризующих состояние исследуемого объекта, имеют между собой корреляционные связи. Тогда говорят о системе случайных величин и о законах распределения таких систем. Например, для системы двух взаимно коррелированных случайных величин  $X$ ,  $Y$  бывает необходимо определять как порознь плотности распределения каждой из них  $f(X)$ ,  $f(Y)$ , так и плотность совместного распределения  $f(X, Y)$  или условные плотности распределения  $f(X|Y)$ ,  $f(Y|X)$ . Как известно из теории случайных величин, перечисленные функции связаны соотношением

$$f(X, Y) = f(X|Y)f(Y) = f(Y|X)f(X). \quad (2.56)$$

Может потребоваться определение отдельных числовых характеристик (моментов) этих функций распределения.

Вычисление статистических характеристик выполняется устройством обработки информации по формулам математической статистики. Исходным материалом служат результаты многократных измерений значений  $X$ ,  $Y$ .

#### 2.4.7 Вычисление статистических характеристик случайных процессов

Перечисленные выше статистические характеристики случайных измеряемых величин дают довольно полное представление о диапазоне разброса их зна-

чений, о зонах предпочтительного сосредоточения, о взаимных корреляционных связях и т.д., но никоим образом не отражают их динамические свойства, т.е. характер изменения во времени. Между тем большую часть измеряемых величин следует рассматривать в процессе их изменения во времени. Как правило, точно предсказать их изменение во времени на основе предшествующих значений нельзя, потому что это случайные функции времени. Их называют также случайными процессами. Но существует набор статистических характеристик, отражающих в усредненном виде именно динамические свойства таких случайных процессов. Во временной области динамика случайного процесса  $X(t)$  хорошо характеризуется автокорреляционной функцией. Для широко распространенного класса эргодических стационарных случайных процессов автокорреляционная функция определяется выражением

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - M(x)][x(t + \tau) - M(x)] dt. \quad (2.57)$$

Эта функция характеризует степень корреляционной связи между ординатами процесса  $x(t)$ , отстоящими одна от другой на интервал  $\tau$ . При этой обработке пара перемножаемых ординат, взятых в моменты  $t$  и  $t + \tau$ , непрерывно скользит по оси времени. Поэтому получается усредненная характеристика. По скорости изменения  $R(\tau)$  можно судить о динамических свойствах процесса  $X(t)$ : чем  $R(\tau)$  затухает медленнее, тем ниже скорость изменения  $X$  во времени, потому что быстрому изменению  $X$  через интервал  $\tau$  от момента  $t$  препятствует наличие корреляционной связи между  $X(t)$  и  $X(t + \tau)$ .

С автокорреляционной функцией однозначно связана преобразованием Фурье частотная характеристика случайного процесса  $S(\omega)$ , называемая спектральной плотностью:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega T} dT. \quad (2.59)$$

Она также характеризует динамические свойства случайного процесса  $X(t)$ , а именно показывает, как распределена по диапазону частот средняя мощность процесса. Чем медленнее затухает автокорреляционная функция, тем спектральная плотность убывает быстрее. Это означает, что медленные процессы имеют узкий частотный спектр. При быстро затухающей корреляционной функции спектр получается, наоборот, широким.

Для характеристики динамики взаимно коррелированных случайных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  используются взаимно корреляционная функция

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - M(X)][Y(t + \tau) - M(Y)] dt \quad (2.60)$$

и связанная с ней преобразованием Фурье взаимная спектральная плотность  $S_{XY}(\omega)$ .

Если в функции измерительной системы входит отыскание перечисленных статистических характеристик случайных процессов, то их расчет производится

устройством обработки информации.

#### 2.4.8 Сжатие данных

Сигналы, с помощью которых передаются разнообразные сообщения, обладают, как правило, очень большой избыточностью в информационном смысле. Поясним это примером. Согласно теореме Котельникова функцию  $X(t)$  с граничной частотой спектра можно однозначно восстановить по значениям дискретных ординат, взятых через интервал  $T = 1/2f_{гр}$ .

В этих ординатах содержится полная информация о функции преобразования  $X(t)$ . Тем не менее трудности восстановления функции преобразования приводят к тому, что практически дискретизацию по времени ведут с интервалом в десятки раз меньшим, а каналы связи занимают избыточными сигналами, несущими чрезвычайно малое количество информации. Между тем каналы связи большой протяженности весьма дороги – велика стоимость их сооружения и эксплуатации. Любое уменьшение избыточности передаваемых сигналов (сжатие данных) позволяет загрузить тот же канал сообщениями от дополнительного числа источников, что дает большой экономический эффект. Сжатие данных позволяет разгрузить устройства хранения информации, что также весьма важно и дает существенную экономию.

Для сжатия данных требуется применять устройства обработки информации. Например, если на приемной стороне имеется устройство, способное умножать дискретные ординаты  $X_i$  на функцию вида  $\sin 2\pi f_{гр}(t - iT)/2\pi f_{гр}(t - iT)$  и суммировать получаемые функции, то можно на передающей стороне выполнять дискретизацию с периодом  $T$ , соответствующим требованию теоремы Котельникова. Необходимо лишь иметь в виду, что при этом восстановление функции  $X(t)$  будет происходить с большим запаздыванием во времени.

Можно получить сжатие данных с помощью более простой обработки сигналов на приемной стороне. Например, вместо ступенчатой аппроксимации функции  $X(t)$  можно применить аппроксимацию прямолинейными отрезками, соединяющими вершины дискретных ординат (рисунок 2.15,а). При той же допустимой погрешности можно выбрать большее значение интервала  $T$ , чем при ступенчатой аппроксимации. Если же аппроксимировать функцию отрезками парабол, соединяющими вершины дискретных ординат (рисунок 2.15,б), то интервал  $T$  можно еще увеличить. Разумеется, степень сжатия данных при этом далеко не та, что при обработке по теореме Котельникова, но зато и обработка много проще и задержка по времени меньше.

Весьма эффективен метод сжатия данных с неравномерным шагом дискретизации по времени. Шаг увеличивается при медленных изменениях  $X(t)$  и уменьшается при быстрых. В простейшем случае это делается так: очередная ордината  $X_i$  передается тогда, когда изменение  $X$  со времени предыдущей передачи достигает заданного значения  $\delta$  (рисунок 2.16), которое определяется требуемой точностью преобразования.

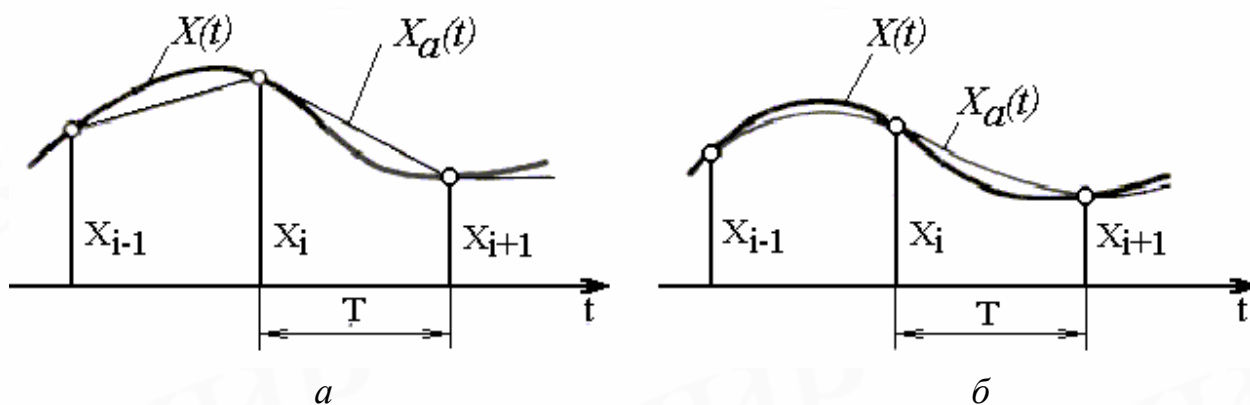


Рисунок 2.15 – Аппроксимация функции  $X(t)$

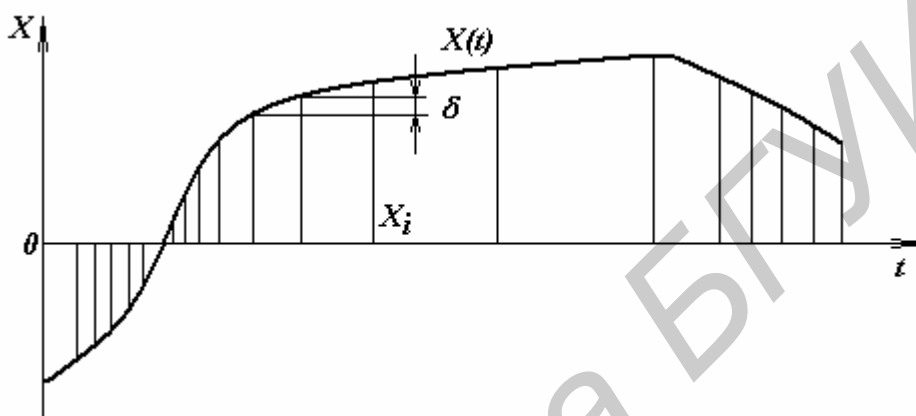


Рисунок 2.16 – Сжатие данных с неравномерным шагом дискретизации

Но больший эффект сжатия данных получается, если установить на передающей и приемной сторонах одинаковые устройства предсказания поведения функции  $X(t)$ . Предсказание ведется на малый интервал времени  $t$ , и с этим же интервалом передающее устройство выполняет отбор ординат  $X(t)$ . Но передача их ведется существенно реже – только тогда, когда значение  $X$  в момент очередного отбора ординаты отличается от предсказанного значения больше чем на  $S$ . Если же предсказание оказывается достаточно точным и передачи по каналу связи не происходит, то приемник воспроизводит предсказанное значение  $X$ . Основой для предсказаний (прогнозирования) служат, с одной стороны, хранящиеся в оперативной памяти сведения о поведении  $X(t)$  в предшествующий отрезок времени, равный нескольким шагам  $t$ , и с другой стороны – сведения о динамических характеристиках случайного процесса  $X(t)$ , например, о его автокорреляционной функции, хранящиеся в постоянной памяти устройства предсказания.

Известны и другие методы сжатия данных. Среди них полезно упомянуть метод статистического кодирования, при котором используются кодовые комбинации неравной длины. Короткие комбинации приписываются значениям  $X_i$ , чаще повторяющимся при передаче, длинные – значениям, реже повторяющимся. Для этого используется код, предложенный Шенноном и Фэно. Обязательным условием его применения является наличие сведений о законе распределения измеряемой величины.

#### 2.4.9 Централизованная и децентрализованная обработка информации



В крупных информационных системах с разнообразной и сложной обработкой информации применяют для этой цели ЭВМ универсального типа, обладающую достаточным быстродействием и необходимым объемом оперативной и постоянной памяти. Структура измерительной системы обеспечивает выполнение требуемых функций. Но она имеет существенный недостаток: любой отказ ЭВМ приводит к нарушению всех функций обработки информации. Для повышения надежности системы применяют резервирование ЭВМ. Но это весьма сложно и дорого.

В последние годы развитие электроники привело к созданию больших интегральных схем (БИС). Из нескольких БИС собирается микропроцессор – объединение арифметико-логического блока с блоком, хранящим микропрограммы для выполнения набора стандартных команд, и блоком микропрограммного управления.

Микропроцессор способен выполнять самые разнообразные математические вычисления и решать логические задачи. Это как бы сердцевина ЭВМ. Но для его работы необходимы дополнительные блоки: оперативной и постоянной памяти, ввода команд и входной информации, вывода результатов вычислений. Все упомянутые дополнительные блоки также существуют в виде БИС.

Объединяя микропроцессоры с набором перечисленных блоков, строят микрокомпьютеры (микроЭВМ). Микропроцессоры и микрокомпьютеры уступают большим ЭВМ по быстродействию и объему памяти, по числу разрядов кодовых слов, с которыми выполняются математические и логические операции. Поэтому они обладают меньшей производительностью. По этим же причинам они, как правило, не приспособлены для использования языков высокого уровня, что создает некоторые дополнительные трудности при программировании. Но вместе с тем у микрокомпьютеров имеются существенные преимущества перед большими ЭВМ и даже перед миникомпьютерами. Это дешевизна, высокая надежность, малые габариты, малое потребление мощности.

Появление микропроцессоров и микрокомпьютеров привело к возможности децентрализации обработки информации с вытекающими отсюда последствиями – повышением надежности и живучести систем, увеличением разнообразия и сложности выполняемых ими функций. Микрокомпьютеры можно специализировать по отдельным задачам или группам родственных задач. На их основе становится рациональным построение блоков, прежде выполнявшихся в виде специализированной электронной аппаратуры.

Возможно, например, такое разбиение функций по обработке информации между микрокомпьютерами:

- 1) линеаризация характеристик, сглаживание сигналов, масштабирование и преобразование кодов;
- 2) вычисление результатов косвенных и совокупных измерений, интегральных расходов, технико-экономических показателей;
- 3) сравнение параметров с уставками, прогнозирование аварийных ситуаций, логическая обработка информации;
- 4) статистическая обработка данных в статике и в динамике;
- 5) сжатие данных.

Для информационных систем, охватывающих территориально разобщенные объекты, может оказаться выгодной децентрализация обработки информации по территориальному признаку или по сложившемуся разделению между объектами по технологическому признаку.

## 2.5 Каналы связи

В предыдущих частях учебного пособия речь шла только об одноканальных системах передачи информации, т.е. о таких системах, в каждой из которых должен измеряться только один входной сигнал и должен быть восстановленным только один управляющий сигнал на выходе. На практике важно, чтобы части системы, осуществляющие преобразование и восстановление измерительной информации, использовались более эффективно. Это достигается с помощью так называемых «мультиплексоров» (устройств сканирования сигнала или коммутаторов), которые обеспечивают считывание всех сигналов путем их быстрого поочередного подключения. Такая процедура является разновидностью временного мультиплексирования. Все входные сигналы проходят через один процессор и через одни и те же части системы, осуществляющие преобразование и распределение измерительной информации. Реализуется принцип временного разделения, в результате чего система становится многоканальной. Одно из достоинств такой системы состоит в том, что стоимость в расчете на один канал (или на один входной сигнал) оказывается значительно меньшей, чем в случае одноканальной системы. Многоканальные системы сбора данных бывают рассчитаны, как правило, на 10–100 каналов, а в промышленности применяются системы с числом каналов до 1000.

Применение этой стратегии при измерениях позволяет одновременно (при частотном мультиплексировании) или последовательно (при временном мультиплексировании) обрабатывать несколько сигналов. Этим методом можно воспользоваться, когда полоса измерительной системы много больше ширины частотного спектра  $F$  измеряемых сигналов. На рисунке 2.17 в качестве иллюстрации показано, как можно использовать *временное мультиплексирование*. Аналоговые входные сигналы поступают из различных точек объекта измерения, где, например, измеряются температура, давление и расход жидкости. Эти сигналы изменяются столь медленно, что быстрая система измерений и управления может поочередно обрабатывать много таких сигналов и выдавать результат их обработки по не меньшему числу выходов (см. рисунок 2.17).

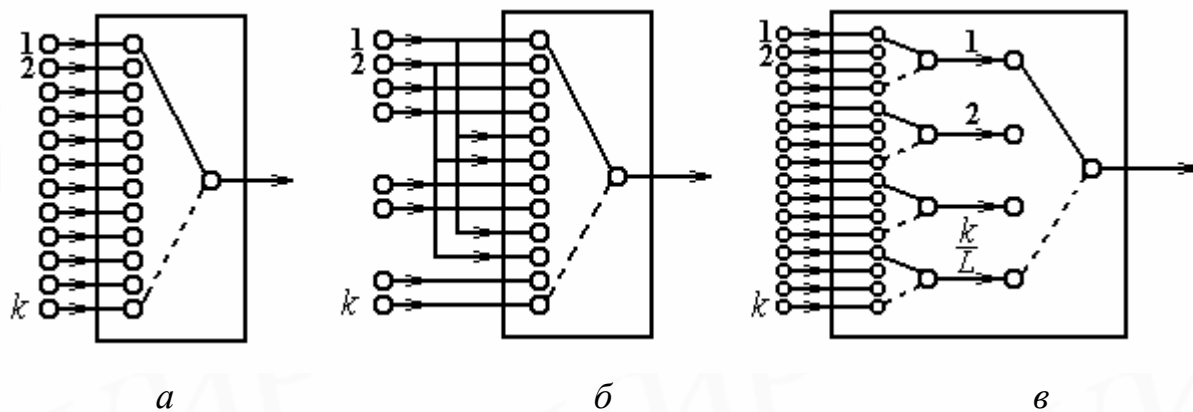
Однако стоимость может стать не столь существенным достоинством системы, из-за того что мультиплексоры (и демультиплексоры на выходе) вносят дополнительные погрешности преобразования, так что достижимая частота взятия выборок уменьшается с ростом числа каналов. В  $k$ -канальной системе обработки измерительной информации наибольшее значение частоты для каждого из  $k$  входных сигналов не может превосходить значение в  $k$  раз меньшее, чем предельная частота в одноканальной системе с теми же самыми схемами преобразования. Демультиплексор на выходе системы сбора данных выполняет всего лишь функцию, обратную мультиплексору, и поэтому ниже мы не будем рассматривать его отдельно.



Рисунок 2.17 – Схема временного мультиплексирования

Обычно мультиплексор состоит из электронных ключей. В прошлом применялись механические переключатели (например в коммутаторе на телефонной станции), но в настоящее время все переключения выполняются с помощью электроники. В простейшем случае мультиплексор содержит  $k$  ключей, которые подключают один из  $k$  входов к одному выходу. Чтобы предотвратить короткое замыкание между двумя входами, эти ключи действуют по принципу переключения (сначала размыкается одна цепь, потом замыкается другая). В простом мультиплексоре переключение происходит только тогда, когда он получает команду от системного блока *синхронизации*. Такой мультиплексор называют *последовательным*: в нем  $k$  каналов подключаются к выходу в том порядке, в каком они присоединены ко входам. В мультиплексорах с *произвольным* доступом применено более гибкое решение: центральный процессор определяет, какой из каналов должен быть подключен, указывая адрес канала. С помощью мультиплексоров с произвольным доступом можно реализовать так называемое *адаптивное мультиплексирование*, т.е. процедуру, согласно которой обращение к узкополосным входным сигналам происходит реже и взятие выборок, таким образом, осуществляется с меньшей частотой, чем для широкополосных входных сигналов. Этот метод позволяет более экономно расходовать ресурс системы в отношении преобразования и обработки, когда входные сигналы значительно отличаются друг от друга по своим спектрам.

Возможны три вида коммутации в мультиплексоре: непосредственная коммутация, сверхкоммутация и подкоммутация. Как показано на рисунке 2.18, непосредственная коммутация реализуется в мультиплексоре, устроенном так, как описано выше: с помощью (фактически) одного переключателя один из  $k$  входов соединяется с выходом. В мультиплексоре, у которого один входной сигнал подан на несколько входов, осуществляется *сверхкоммутация*. При сверхкоммутации число входов, на которые подается сигнал, определяется требуемой частотой взятия выборок для этого сигнала. Такой метод представляет собой аппаратное решение проблемы обработки широкополосных входных сигналов. Очевидно, что это достигается за счет уменьшения общего числа каналов. В примере, приведенном на рисунке 2.18,б, частота взятия выборок у первых двух каналов в четыре раза выше, чем у остальных; общее число каналов уменьшается в этом случае на шесть.



$a$  – непосредственная коммутация  $k$  каналов;  $б$  – сверхкоммутация каналов 1 и 2;  $в$  – подкоммутация  $k$  каналов по 4

Рисунок 2.18 – Коммутация аналоговых сигналов

Непосредственную коммутацию, показанную на рисунке 2.18, $a$ , не так легко осуществить практически, особенно в случае мультиплексов с большим числом каналов. Проблема заключается в перекрестных помехах и частичном прохождении на выход сигналов из тех каналов, которые в данный момент отключены. Эта проблема возникает из-за того, что электронные ключи, выполненные, например, на полевых транзисторах, не являются идеальными. Кроме того, каждый ключ добавляет паразитный (нагрузочный) импеданс между входом и землей. Если мы поместим большое число ключей параллельно, то уровни шумов и эффекты, связанные с нагрузкой, окажутся недопустимыми. Поэтому в мультиплексах с большим числом каналов применяется так называемая *подкоммутация*. Как показано на рисунке 2.18, $в$ , подкоммутация осуществляется в несколько этапов. В примере, приведенном на рисунке, один канал мультиплексора с непосредственной коммутацией (рисунок 2.18, $a$ ) подвержен действию перекрестных помех со стороны, скажем, пятнадцатью другими каналами, тогда как в схеме, показанной на рисунке 2.18, $в$ , число каналов, служащих источником перекрестных помех, ограничено тремя каналами и тремя подканалами.

Для передачи сообщений на расстояния, превышающие несколько километров, в измерительных системах редко выделяются самостоятельные линии связи, поскольку стоимость их сооружения высока. Каналы большой протяженности для передачи сообщений в них организуются обычно на линиях связи, используемых в основном для телефонирования и телеграфирования. На одной линии создают множество каналов, разделяя их по частоте с помощью амплитудной или частотной модуляции. Кроме линий связи для организации каналов используются высоковольтные линии электропередачи. Каналы по этим линиям создаются путем наложения высокочастотных сигналов.

Наконец, для организации каналов используются радиолнии направленного действия, работающие в диапазоне ультракоротких волн. Такие линии называют радиорелейными. Реже используются радиолнии ненаправленного действия. В последнее время получают распространение оптические каналы связи, отличающиеся высокой помехоустойчивостью и пропускной способностью. Для передачи информации по таким линиям связи используется частотное мультип-

лексирование.

При частотном мультиплексировании узкополосный измеряемый сигнал посредством модуляции, осуществляемой с помощью модулятора, сдвигается в другой (например более высокий) диапазон частот. Это осуществляется таким образом, чтобы спектры нескольких преобразуемых измеряемых сигналов занимали соседние интервалы частот без перекрытия (рисунок 2.19). Для восстановления каждого сигнала в его исходной полосе частот на выходе измерительной системы необходимо осуществить его демодуляцию, что осуществляется с помощью демодулятора.

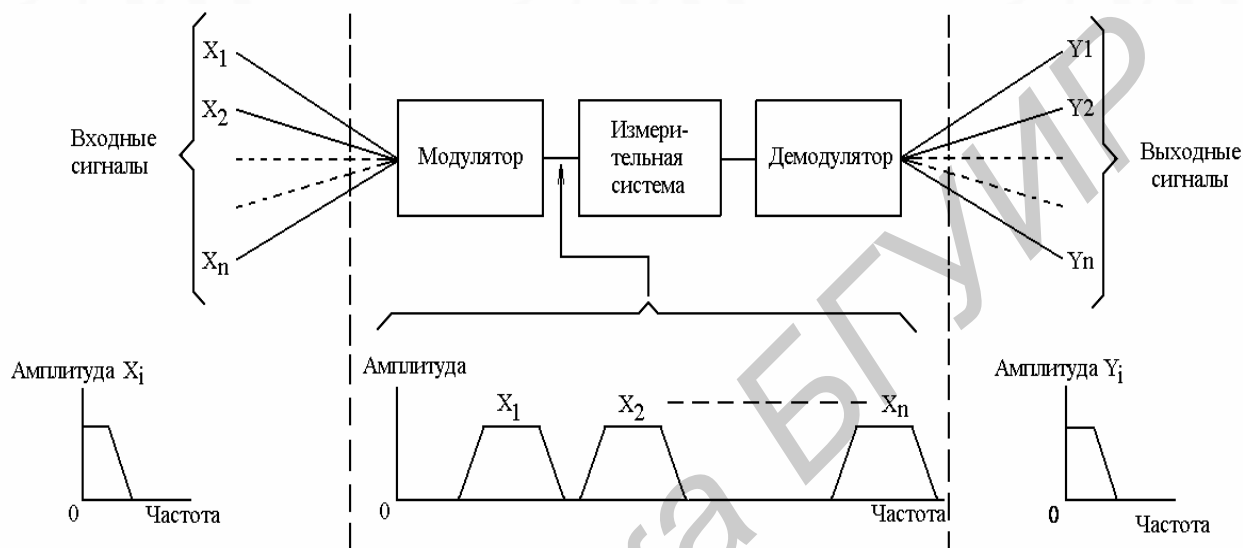


Рисунок 2.19 – Частотное мультиплексирование

Структурная схема передающей части каналообразующей аппаратуры, предназначенной для частотного уплотнения проводной линии связи, приведена на рисунке 2.20. Аппаратура создает  $N$  узкополосных каналов в диапазоне звуковых частот. Она содержит  $N$  идентичных цепей модуляции и фильтрации, каждая из которых работает на своей несущей частоте. В первую цепь, например, входят модулятор, гетеродин несущей частоты и полосовой фильтр. Последний необходим потому, что в общем случае диапазон частот модулированного сигнала может быть чрезвычайно широким. Если его не ограничить, то он перекроет области частот, отведенные для работы других каналов. Тогда после суммирования модулированных сигналов их не удастся разделить на приемной стороне. Полоса пропускания каждого фильтра выбирается таким образом, чтобы между соседними полосами оставался защитный диапазон порядка нескольких десятков герц.

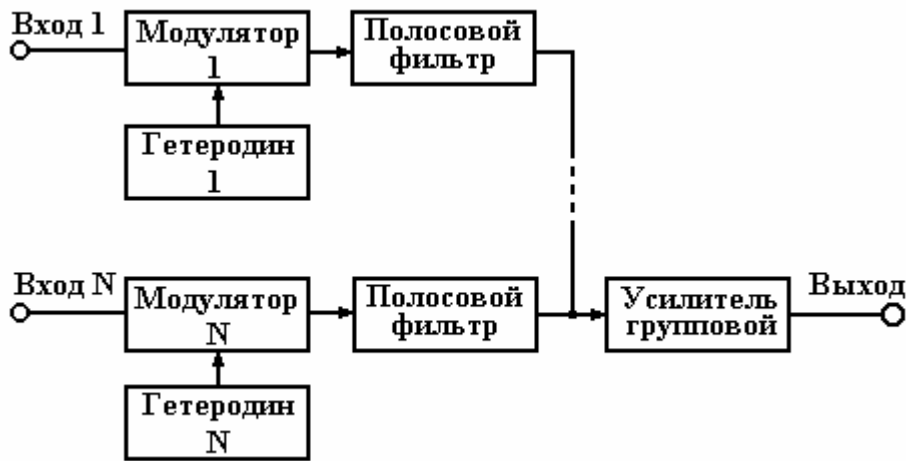


Рисунок 2.20 – Структурная схема передающей части каналообразующей аппаратуры

Сигналы с выходов полосовых фильтров суммируются и через групповой усилитель подаются на выход, в линию связи.

Схема приемной части каналообразующей аппаратуры приведена на рисунке 2.21. Входной сигнал из линии связи пропускается через групповой усилитель и поступает на N идентичных цепей демодуляции. Первая цепь, например, содержит на входе полосовой фильтр, выделяющий модулированный сигнал первого канала. Далее следует демодулятор, работой которого управляет гетеродин несущей частоты данного канала. Сигнал от демодулятора сглаживается фильтром нижних частот и через усилитель поступает на выход данного канала, т.е. к приемнику измерительной информации.

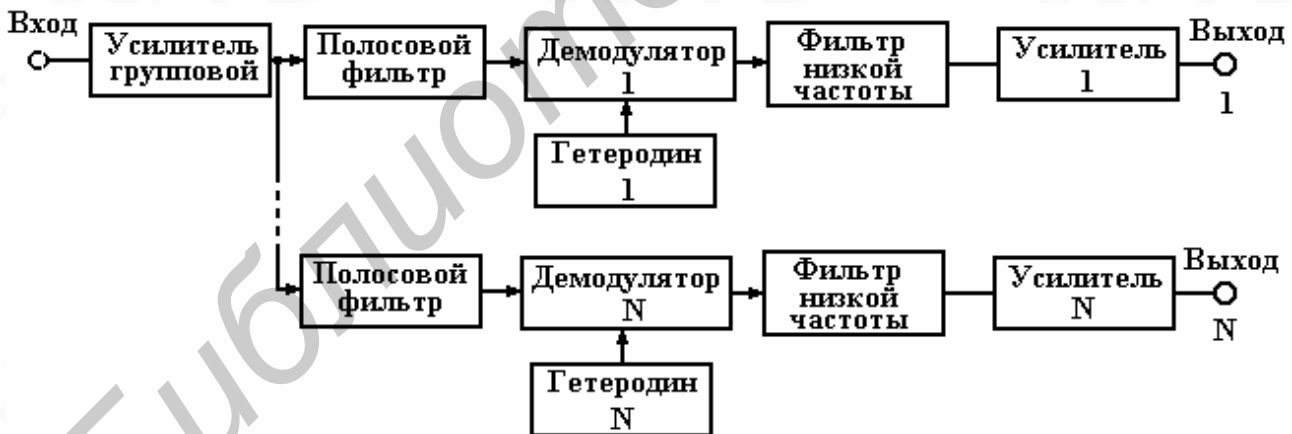


Рисунок 2.21 – Структурная схема приемной части каналообразующей аппаратуры

С помощью одной цепи модуляции, показанной на рисунке 2.20, и одной цепи демодуляции, показанной на рисунке 2.21, организуется симплексный канал, т.е. канал для передачи информации в одном направлении. Для обеспечения двустороннего обмена информацией по одной линии связи необходимо организовать на каждой стороне линии, идентичные цепи модуляции и демодуляции, используя для них различные несущие частоты. Сумма двух симплексных каналов, работающих во встречных направлениях на разных частотах, образует один

дуплексный канал.

### Контрольные вопросы

1 Каковы цели обработки физических сигналов? Сравните аналоговые и цифровые методы обработки сигналов измерительной информации. Укажите их достоинства и недостатки.

2 Приведите основные методы линеаризации функций преобразования измерительных преобразователей. Понятие линейности.

3 Как осуществляется линеаризация функции преобразования путем коррекции нелинейности преобразователя?

4 В чем заключаются достоинства дифференциального включения нелинейных преобразователей (например емкостных)?

5 Как производится коррекция нелинейности функции преобразования измерительной схемы с параметрическими преобразователями?

6 Приведите примеры коррекции погрешности нелинейности путем нелинейного преобразования электрического сигнала с помощью умножителей напряжения, делителей напряжения.

7 В чем заключается принцип линеаризации функции преобразования путем аппроксимации измерительного сигнала полиномами? Приведите пример полинома и его аппаратурную реализацию.

8 Цифровые методы линеаризации. Обоснуйте методику проведения операции линеаризации с помощью ЭВМ.

9 Нормирование измерительной информации. Какие методы используются для этой цели и как они реализуются?

10 Как производится вычисление результатов косвенных, совокупных и совместных измерений. С помощью каких устройств это можно реализовать?

11 В чем суть операции сглаживания данных? С помощью каких устройств эта операция производится в измерительных системах?

12 Как производится сглаживание данных в измерительных системах? Поясните алгоритм работы таких устройств.

13 С какой целью производится преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно?

14 Почему, применяя статистическую обработку сигналов измерительной информации, добиваются улучшения метрологических характеристик измерительных систем?

15 В чем заключается отличие централизованной и децентрализованной обработки измерительной информации? В каких случаях они применяются?

16 Какие методы передачи измерительной информации применяются в измерительных системах? Обоснуйте принцип передачи измерительной информации с использованием традиционных линий связи.

17 В чем заключается принцип частотного разделения каналов при передаче измерительной информации? Обоснуйте его аппаратурную реализацию.

### 3 ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

## ВЕЛИЧИН С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Автоматизация измерений неэлектрических (геометрических) величин невозможна без внедрения приборов с электронной обработкой измерительной информации. Наметившаяся тенденция позволяет создавать качественно новые средства измерений, наиболее полно удовлетворяющие требованиям промышленности. Такие приборы позволяют значительно повысить точность и производительность измерений, обеспечивают различные возможности их автоматизации. Электронные приборы позволяют быстро (без настройки) переключать цену деления; регулировать смещение «нуля» прибора электронными средствами, что дает возможность обойтись без сложных устройств микроподачи; подключать к ним автоматические регистрирующие устройства (графопостроители, самописцы, печатающие машины, дисплеи и др.).

Дальнейший прогресс в измерительной технике тесно связан с применением микропроцессоров и компьютеров в составе измерительных приборов. Наиболее органично компьютеры встраиваются в электронные приборы и позволяют уменьшить трудоемкость измерений за счет управления сложными процессами измерений; автоматически вводить коррекцию систематической составляющей погрешности СИ, автоматически производить обработку результатов измерений с вычислением статистических характеристик.

### 3.1 Вихретоковые преобразователи накладного типа и аппаратура контроля механических величин

В технике измерений существует класс преобразователей механических величин и параметров движения (взаимное расположение объектов, величина зазора, число оборотов), основанных на эффектах вихревых токов. Основу таких преобразователей составляют катушки индуктивности, выполняющие роль чувствительного элемента.

Изменение параметров катушки (сопротивление, индуктивность) обусловлено взаимодействием ее электромагнитного поля с материалом объекта контроля. Степень влияния объекта на параметры катушки характеризуется обобщенным параметром контроля

$$\beta_0 = r\sqrt{\omega\mu_a\sigma},$$

- где  $r$  — средний радиус эквивалентного витка;  
 $\omega$  — частота возбуждающего тока;  
 $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость;  
 $\sigma$  — удельная электропроводность.

Сопротивление катушки зависит не только от ее взаимного расположения с объектом контроля, но и от многих других факторов, и в том числе от дефектов и шероховатости поверхности. Поэтому получаемая информация является многопараметровой. Наряду с преимуществами это определяет и определенные труд-



ности и обуславливает необходимость применения специальных методов подавления влияющих факторов.

Учитывая простоту технической реализации, а также условие  $\beta_0 > 50$ , целесообразно в преобразователях для контроля механических величин объектов использовать однопараметровый метод выделения информации.

Полагая объект контроля эквивалентным контуром вихревых токов и на основании теории связанных электрических цепей, полное сопротивление катушки можно также представить в виде

$$Z_k = R_k + j\omega L_k = R_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} R_1 + j \left( \omega L_0 - \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \omega L_1 \right),$$

где  $R_1, L_1$  – сопротивление и индуктивность объекта;

$R_0, L_0$  – сопротивление и индуктивность ненагруженной катушки;

$M$  – коэффициент взаимной индукции.

Таким образом, например, определяя изменение активного и индуктивного сопротивления катушки, можно судить о геометрических параметрах объекта контроля. На практике катушка преобразователя включается в электрическую схему, преобразующую изменение комплексного сопротивления в изменение амплитуды и фазы (или частоты) напряжения.

Основные требования, предъявляемые к вихретоковым преобразователям неэлектрических (механических) величин: большой диапазон измерения, высокая линейность его характеристики, помехоустойчивость. В этой связи приемлемые результаты достигаются путем включения катушки в контурные и генераторные измерительные цепи. При включении вихретокового преобразователя в контурную измерительную цепь находит применение фазовый метод выделения информации (рисунок 3.1).

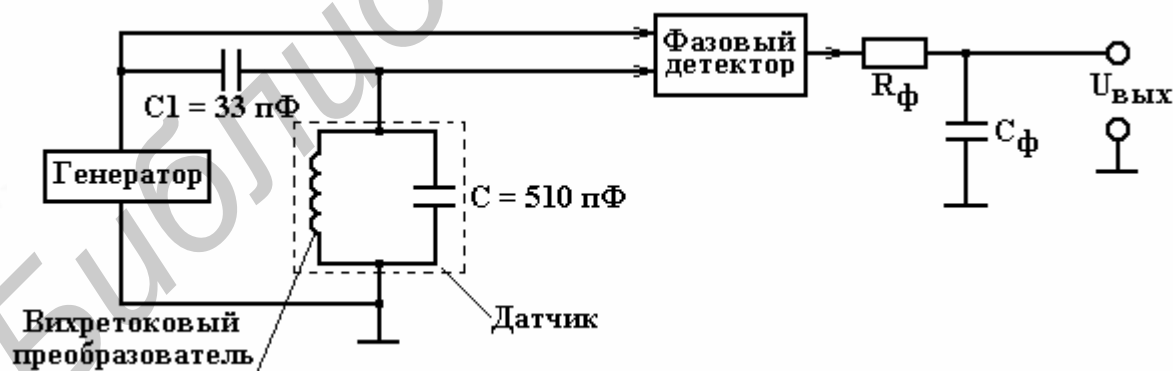


Рисунок 3.1 – Фазовый метод выделения информации при использовании вихретокового преобразователя

Высокочастотный генератор запитывает резонансный контур, образованный катушкой  $L$  преобразователя и емкостью  $510$  пФ. Сигналы с генератора и контура поступают на фазовый детектор, разностный сигнал которого (длительность импульса), пропорциональный значению зазора  $\delta$  между объектом контроля  $1$  и катушкой преобразователя  $2$  (рисунок 3.2), поступает после фильтрации на вы-

ход измерительной цепи в виде выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

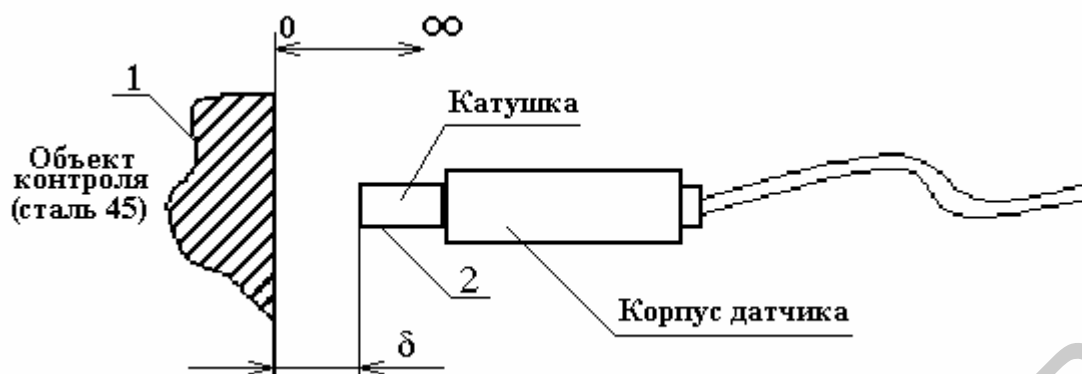


Рисунок 3.2 – Схема расположения вихретокового преобразователя относительно объекта контроля

Для исследований различных методов выделения измерительной информации применяется вихретоковый измерительный преобразователь с параметрами: индуктивность обмотки – 30 мГн, активное сопротивление – 2,1 Ом, радиус обмотки ( $r_0$ ) – 4,0 мм.

Резонансная частота колебательного контура в отсутствие объекта контроля  $f_{p1}$  (при  $\delta = \infty$ ) составляет 0,957 МГц. Приближение преобразователя к объекту контроля обуславливает уменьшение индуктивности катушки и соответственно добротности контура. При нулевом зазоре ( $\delta = 0$ ) резонансная частота контура  $f_{p2}$  становится равной 1,01 МГц. Резонансные кривые контура для зазоров  $\delta = 0$  и  $\delta = \infty$  представлены на рисунке 3.3.

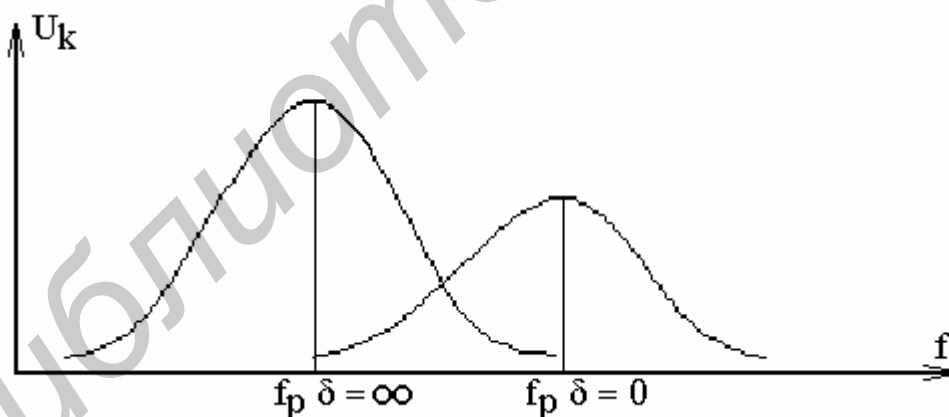
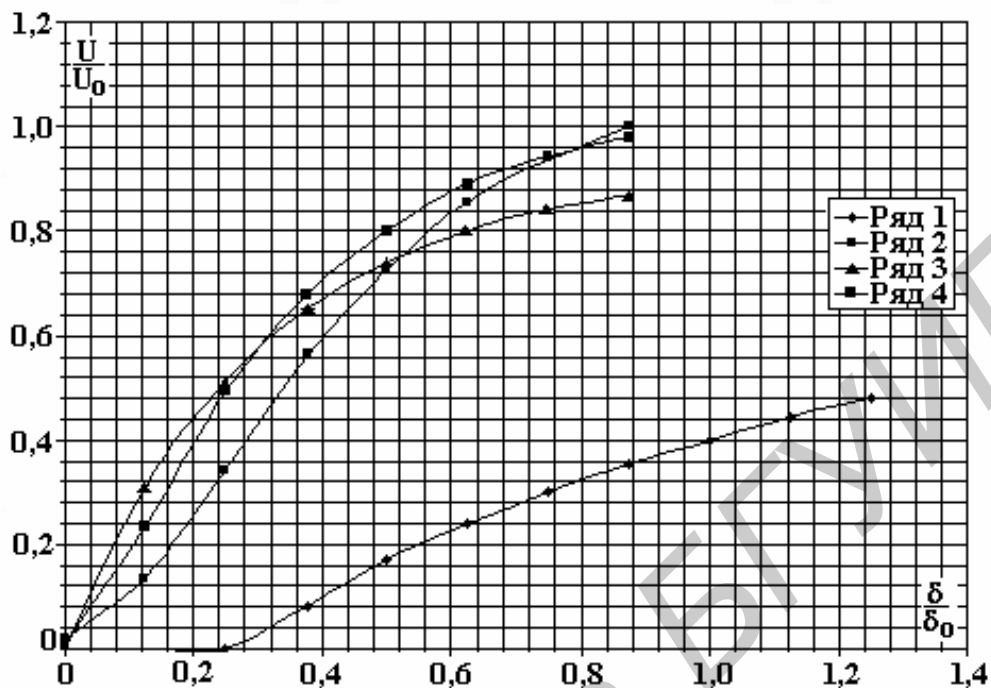


Рисунок 3.3 – Фазовый метод выделения сигнала

Важное значение имеет выбор частоты задающего генератора  $f_{\Gamma}$  относительно резонансных частот контура  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$ , поскольку их соотношение определяет закон изменения фазового сдвига и, как следствие, такие параметры, как линейность, чувствительность и диапазон преобразуемых значений.

На рисунке 3.4 представлены экспериментальные выходные характеристики преобразователя для различных значений  $f_{\Gamma}$  и объекта контроля, выполненного из материала сталь 45. Очевидно, что, подбирая частоту  $f_{\Gamma}$  относительно значений резонансных частот  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$ , можно добиться приемлемой линейности функ-

ции преобразования ( $\pm 2,5\%$ ) в диапазоне изменения положения преобразователя  $\pm 1,0$  мм для катушки с  $r = 4,0$  мм. Линейность характеристики улучшается при снижении добротности резонансного контура, например путем введения короткозамкнутого витка.



Ряд 1 –  $f_r = f_0 = 957$  кГц; Ряд 2 –  $f_r = 985$  кГц  $> f_{0P1}$ ;  
 Ряд 3 –  $f_r = 1,025$  МГц  $> f_{кP2}$ ; Ряд 4 –  $f_r = 1,01$  МГц  $= f_{кP2}$ ;  
 $U_0$  – напряжение при  $f_r = 985$  кГц

Рисунок 3.4 – Выходные характеристики измерительного преобразователя

Учитывая перспективность использования частотных преобразователей, преобразующих значение измеряемой неэлектрической величины в пропорциональную ему частоту выходного сигнала, были проведены исследования работы автогенераторной схемы с катушкой вихретокового преобразователя (рисунок 3.5). Наряду с простотой схемной и конструктивной реализации такая схема дает высокую точность и помехоустойчивость, характерную для преобразователей с цифровым (кодовым) выходом.

Настройка генератора импульсных сигналов осуществляется изменением параметров элементов схемы (резистора  $R_1$  и конденсаторов  $C_2, C_3$ ). На выходе схемы формируются прямоугольные импульсы (меандр) с амплитудой 5,0 В и частотой повторения  $f$ , которая зависит от взаимного расположения катушки преобразователя и объекта контроля. Выходные характеристики  $f = F(\delta)$  данной схемы для материалов объекта 20X13, 12X18M10 приведены на рисунке 3.6. Исходная частота в отсутствие объекта контроля ( $\delta = \infty$ ) составляла 1,29 МГц.

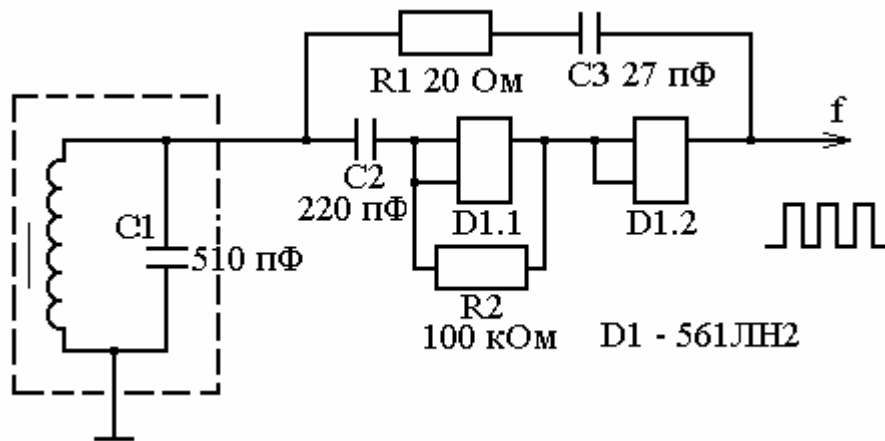
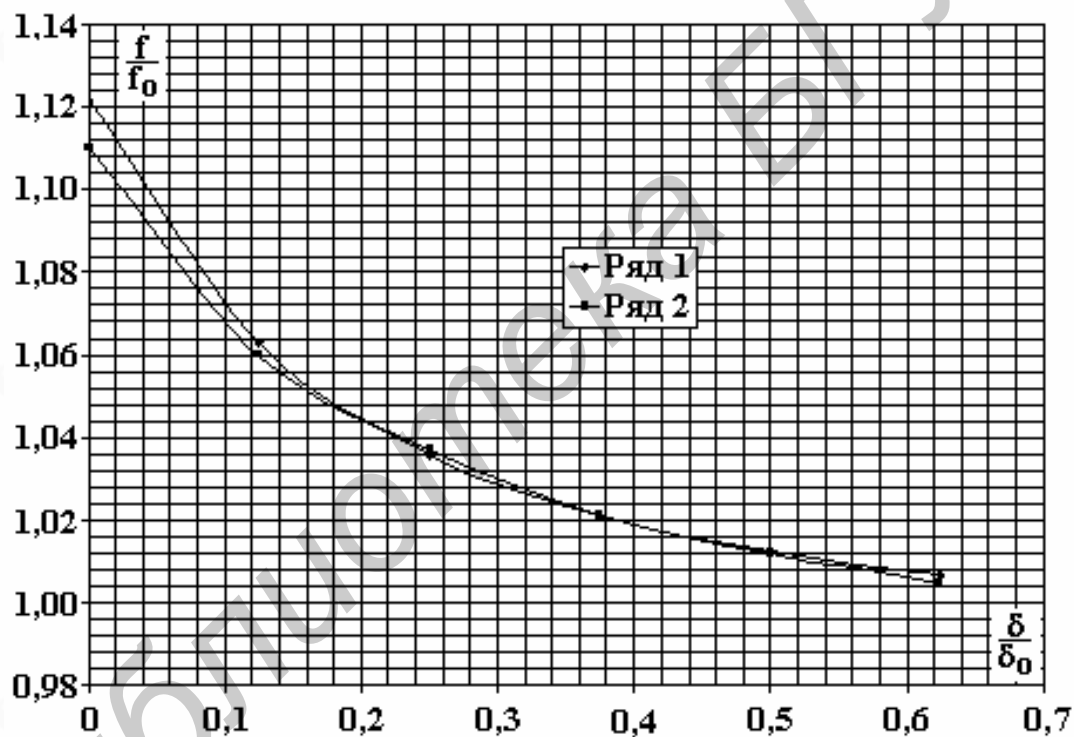


Рисунок 3.5 – Схема генератора с частотным выходом

Анализ функций преобразования, приведенных на рисунке 3.6, показывает, что зависимости носят нелинейный, гиперболический характер и обуславливают необходимость применения схемных и программных методов линеаризации.



Ряд 1 – 20X13; ряд 2 – 12X18M10

Рисунок 3.6 – Выходная характеристика преобразователя в автогенераторной схеме

Для контроля малых линейных перемещений измерительные катушки преобразователей могут выполняться с применением микроэлектронных технологий. При формировании обмоток методами микроэлектронных технологий получают обмотки плоского вида типа «спираль». Они содержат небольшое число витков и плоскую геометрию и, как следствие, небольшую индуктивность. Вместе с тем микропроводники обмотки обуславливают ее большое активное (оми-

ческое) сопротивление.

Данные экспериментальных исследований микрокатушки с параметрами  $L = 6,0 \text{ мкГн}$ ,  $R = 23,3 \text{ Ом}$ ,  $r = 2,4 \text{ мм}$  приведены в работе [10]. Обмотки спирального типа расположены на двух сторонах диэлектрической подложки. Резонансная частота измерительного преобразователя, включенного в контурную измерительную цепь, составляет  $15,75 \text{ МГц}$ , добротность – 7. Низкая добротность и высокая частота создают определенные схемотехнические трудности. Проведенный анализ возможных схемотехнических решений показал, что наиболее оптимальным схемным решением для низкодобротных катушек является использование дифференциального релаксационного генератора. В этом случае частота генерируемых колебаний определяется разностью постоянных времени времязадающих цепей (емкостной и индуктивной) генератора. Для микрокатушки с вышеупомянутыми параметрами в отсутствие объекта контроля ( $\delta = \infty$ ) частота генерируемых колебаний составляет  $1,736 \text{ МГц}$ . Изменение зазора  $\delta$  между микрокатушкой и объектом контроля в диапазоне  $0 < \delta \leq 2r$  приводит к изменению частоты выходного сигнала. В этом случае девиация частоты может составлять  $0,392 \text{ МГц}$ , что является приемлемым для реализации вихретокового накладного преобразователя с микрокатушкой.

Для измерителей, использующих амплитудный способ выделения измерительной информации, характерна структурная схема включения измерительного преобразователя, приведенная на рисунке 3.7. В частотозадающий колебательный контур генератора включена обмотка вихретокового преобразователя. При изменении зазора между измерительным преобразователем и объектом контроля изменяется индуктивность катушки преобразователя, что вызывает изменение частоты генерируемых генератором колебаний.

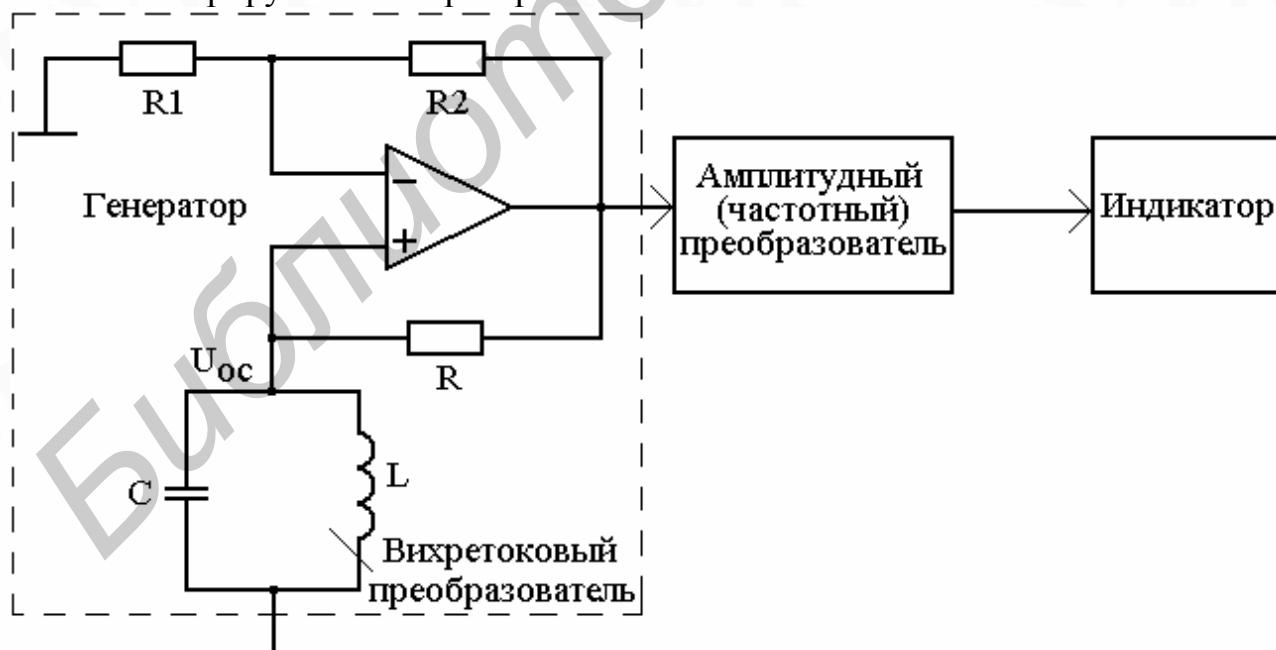


Рисунок 3.7 – Структурная схема измерителя, использующего амплитудный (частотный) способ выделения информации

Выходное напряжение генератора поступает на амплитудный (или частотный) преобразователь, постоянное напряжение с выхода которого, пропорцио-

нальное амплитуде или отклонению частоты и амплитуды от номинального значения, поступает на индикатор, проградуированный в единицах преобразуемой неэлектрической величины  $\delta$ .

Для решения измерительных задач, возникающих в процессе эксплуатации различных объектов измерения, возможно использование следующей аппаратуры:

- преобразователи зазора и вибрации ДЗВ (датчик зазора и вибрации);
- преобразователи перемещения ДПТ;
- блоки согласования для преобразователей ДЗВ и ДПТ;
- цифровые блоки обработки для преобразователей ДЗВ и ДПТ;
- индуктивные преобразователи перемещений.

Перечисленные преобразователи используются, в основном, для преобразования в электрический сигнал таких неэлектрических величин, как: осевое смещение (ОС), виброперемещение (ВП), осевой сдвиг ротора (ОСР), относительное расширение ротора (ОРР), тепловое расширение турбин (ТРТ), число оборотов вала турбины (ТХ) и искривление вала, например турбины (ИВ).

Габаритный чертеж преобразователя (датчика) ДЗВ-08, являющегося одним из представителей семейства перечисленных выше преобразователей неэлектрических величин, приведен на рисунке 3.8. Преобразователь состоит из конструктивно объединенных индуктивного преобразователя и конденсатора, заключенных в круглый корпус и образующих колебательный контур, соединительного коаксиального кабеля с разъемом СР-50, предназначенного для подключения преобразователя к вторичным измерительным преобразователям.

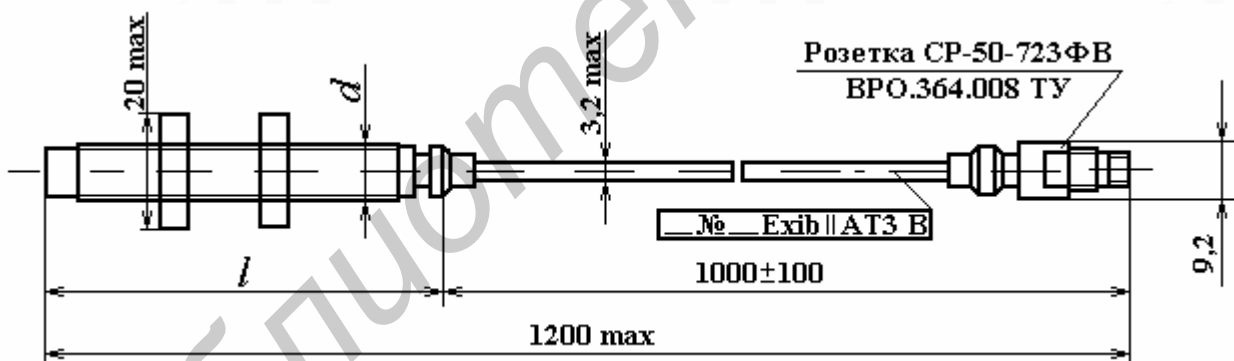


Рисунок 3.8 – Габаритный чертеж преобразователя зазора и вибрации ДЗВ-08

### 3.2 Электроконтактные преобразователи

Электроконтактные преобразователи предназначены для разбраковки деталей на «годные» и «брак», рассортировки деталей на размерные группы, а также могут быть использованы в качестве электронного индикатора контакта. Электроконтактные преобразователи входят в состав контрольно-сортировочных автоматов, приборов управляющего (активного) контроля, контрольных приспособлений, применяются в щупах координатных измерительных машин как индикаторы контакта и в приспособлениях для измерения малых отверстий (от 1 до 13,5 мм) к оптическим измерительным приборам горизонтального исполнения.

Принцип действия электроконтактного преобразователя заключается в использовании перемещения измерительного стержня для замыкания или размыкания электрических контактов, включенных в электрическую цепь со светосигнальным или исполнительным устройством. Имеются три вида преобразователей: предельные (преобразователи размеров), определяющие соответствие контролируемого размера установленной размерной группе, в частности полю допуска; амплитудные (преобразователи колебания размеров), сравнивающие колебания размера (овальность, биение, плоскостность и т.д.) с допустимым, и индикаторы контакта, фиксирующие «координатное» положение контактного щупа измерительного прибора.

Конструкции электроконтактных преобразователей представлены на рисунке 3.9. Предельный преобразователь (рисунок 3.9,а) модели 233 имеет две пары контактов 2, 3 и 6, 7, замыкание которых происходит за счет перемещения наконечника 1 измерительного стержня 9 при изменении размеров контролируемой детали 10. Движение подвижным контактам 2 и 7 передается от измерительного стержня 9 через рычаг 8. Замыкание каждой пары контактов настраивается микрометрическими винтами 4 и 5 по образцам с предельными размерами I и II.

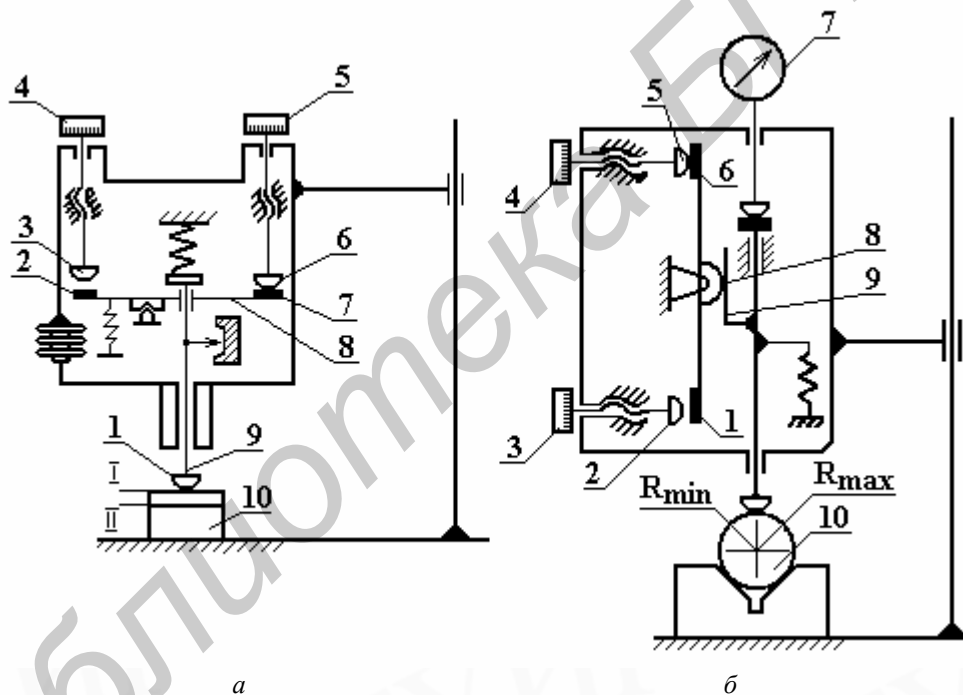


Рисунок 3.9 – Электроконтактные преобразователи

Амплитудный преобразователь (рисунок 3.9,б) отличается от предельного тем, что он должен выявлять только колебания размера (например, отклонения от круглости, прямолинейности и т.д.) независимо от его значения. Для этого в схему механизма вводят фрикционное звено (полуцилиндр 8 и планка 9), допускающее проскальзывание подвижных элементов преобразователя после замыкания какого-либо из контактов.

При подключении контактов 5, 6 и 1, 2 к светофорному устройству и настройки замыкания контактов (с помощью микрометрических винтов 4 и 3 по измерительной головке 7 или образцовой детали) на допуск отклонения формы (от замыкания одной пары контактов до замыкания другой пары без проскальзы-

вания) форма детали 10 будет в пределах поля допуска при замыкании лишь одной пары контактов или загорании лишь одной лампочки светофора.

Третий вид электроконтактных преобразователей – электронный индикатор контакта (ИК) используется в электроконтактной головке в составе отдельных приборов различных моделей (рисунок 3.10). Эта головка является приспособлением к горизонтальным оптиметрам, длинномерам, интерферометрам, а также к измерительным машинам. Она предназначена для измерения внутренних размеров от 1 до 13,5 мм с практически нулевым измерительным усилением (около 0,01 мН).

Основой конструкции является съемный стол 12, который устанавливают на предметный стол 13 горизонтальных приборов. На съемном столе имеются два вспомогательных угольника 4 и 10, с которыми контактируют наконечники пинноли 3 и отсчетного устройства 11. Измеряемую деталь 9 закрепляют на съемном столе 12. На основании прибора 1 устанавливают стойку 5, на кронштейне 6 которой крепят измерительный стержень 8 с шариковым наконечником 2. Наконечник 2 и деталь 9 включаются в электрическую цепь с источником напряжения и индикатором (лампочкой) 7. В момент касания наконечника с деталью цепь замыкается, лампочка загорается и производится отсчет показаний по устройству 11.

При установке головки на длинномер или измерительную машину диаметр отверстия  $D$  определяют методом непосредственного отсчета по шкале прибора и вычисляют по формуле  $D = a_1 - a_2 + d$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – отсчеты в двух диаметрально противоположных точках измеряемого кольца 9;  $d$  – диаметр шарикового наконечника по аттестату.

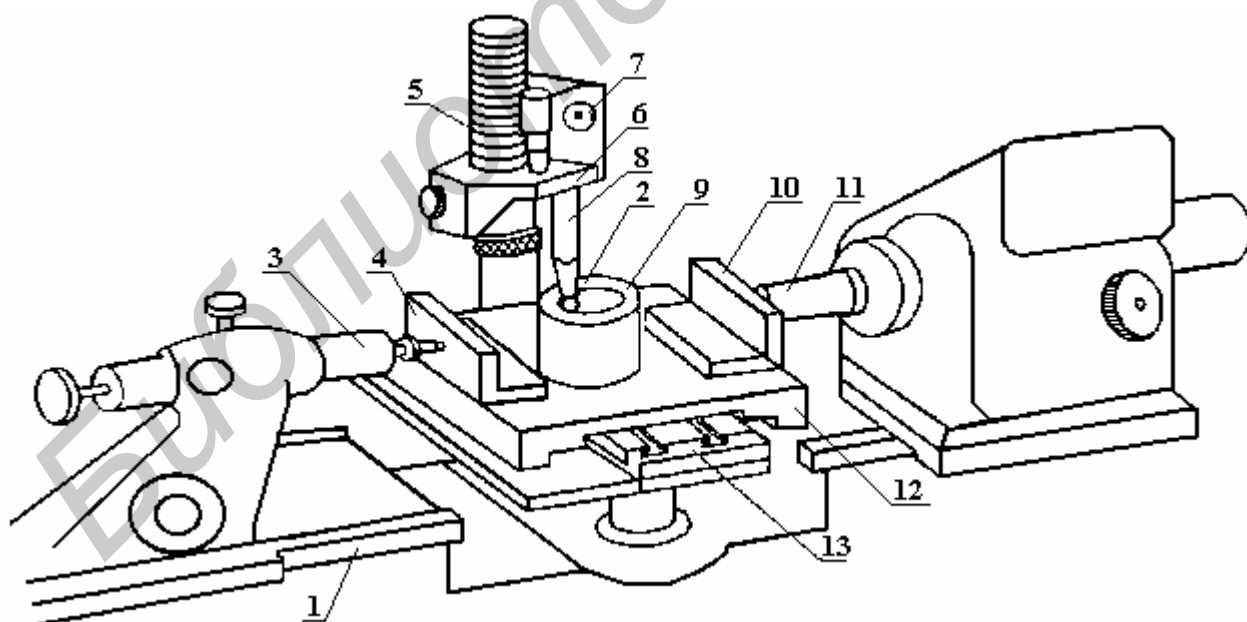


Рисунок 3.10 – Электронная головка на горизонтальном длинномере

При установке головки на горизонтальный оптиметр диаметр отверстия вычисляют по формуле  $D = l_c + C + d$ , где  $l_c$  – действительный размер блока по сертификату;  $C$  – разность отсчетов по шкале трубки оптиметра в двух диаметрально противоположных точках измеряемого кольца. При измерении на оптиметре блок с боковиками устанавливают на съемный стол 12. Над блоком закрепляют



плюют измеряемое кольцо 9. Измерительный наконечник вводят в боковину блока, делают отсчет, затем поднимают на кольцо, настраивают на диаметр и производят отсчет отведением – подведением при замыкании шарикового наконечника 2 и кольца 9.

Представленное на рисунке 3.10 приспособление комплектуется измерительными стержнями с шариковыми наконечниками диаметром 0,93; 1,13; 1,33; 1,53; 1,73; 1,93; 2,5; 5,00 и 6,00 мм.

Электронный индикатор контакта устанавливают в кассету многооперационных станков (обрабатывающих центров) на координатные измерительные машины (КИМ) не для прямого контроля линейных размеров (диаметр, длина и т.д.), а для определения координат проверяемой точки детали в системе координат станка или КИМ. ИК формирует релейный сигнал о контакте своего наконечника с препятствием (поверхностью контролируемой детали) при движении ИК независимо от ориентации этой поверхности относительно направления движения головки с ИК. По этому сигналу отсчитывают значения трех координат в пространстве.

В качестве примера на рисунке 3.11 приведена электроконтактная головка модели ТР-1 с внутренним контактом. Измерительный рычаг 1, имеющий на одном конце сферический наконечник 2 (или наконечник другой формы), другим своим концом через сменный переходник 3 (адаптер) крепится к центральной части мембраны 12. Мембрана дает возможность поворачивать рычаг 1 в пределах пространственного угла  $\alpha$  от 0 до  $28,5^\circ$ , что обеспечивает отсчет по координатам X и Y. Измерительный рычаг 1 жестко связан с диском 4, на котором через  $120^\circ$  расположены подвижные контакты в виде шариков 10. В исходном положении каждый шарик опирается на свою пару цилиндров 11 (неподвижные электрические контакты) и замыкает электрическую цепь последовательно соединенных цилиндров по отношению к внешнему источнику питания (разъем 6).

Такое касание (замыкание) в шести точках создает полную однозначность положения наконечника по трем координатам X, Y и Z. При любом смещении наконечника в момент касания его с контролируемой деталью хотя бы один из шариков отходит от одной из трех пар цилиндров и разрывает электрическую цепь, что является сигналом для снятия отсчета. Головку 5 устанавливают на подвижный кронштейн 8 с помощью штифтов 7 и однозначно фиксируют с использованием центрального шарика 9.

Перечисленные модели индикаторов контакта имеют угол отклонения измерительного рычага по осям X и Y до  $28,5^\circ$  при его линейном перемещении до 17 мм по оси Z, размах срабатывания 2 мкм. Для надежного срабатывания контактов головку ИК герметизируют и наполняют аргоном.

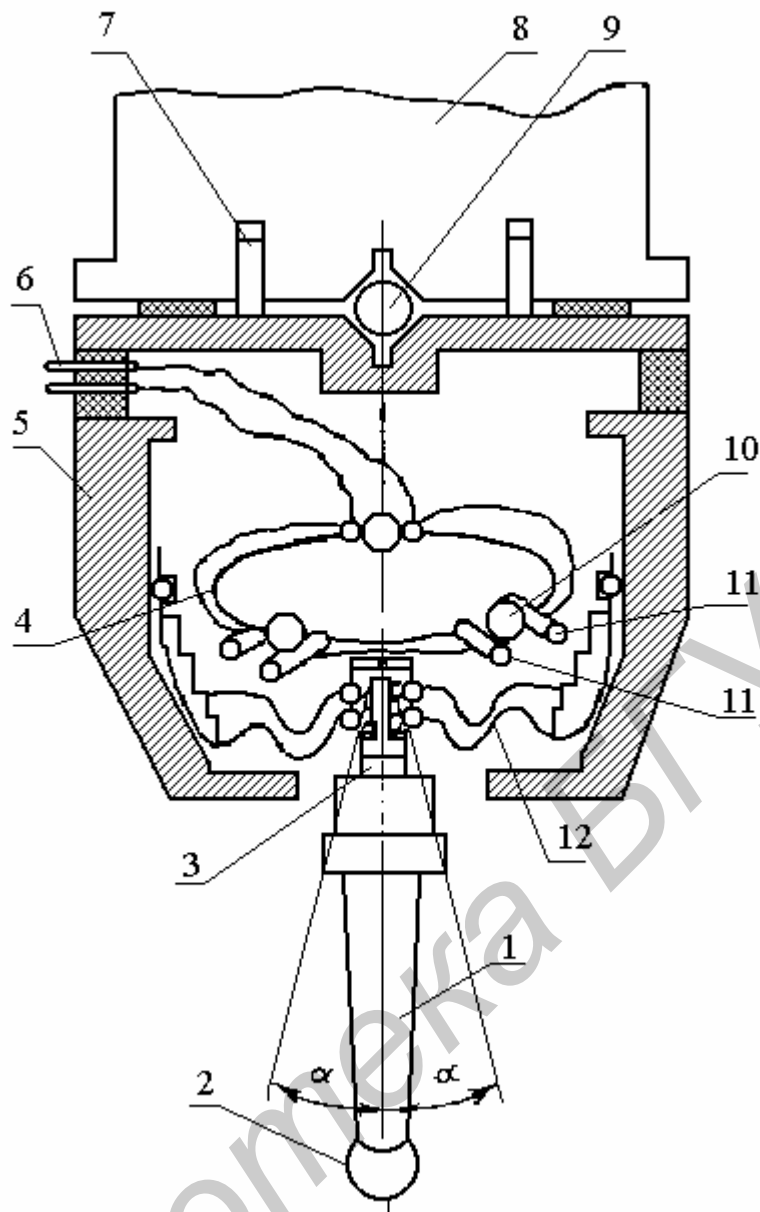


Рисунок 3.11 – Электронный индикатор контакта

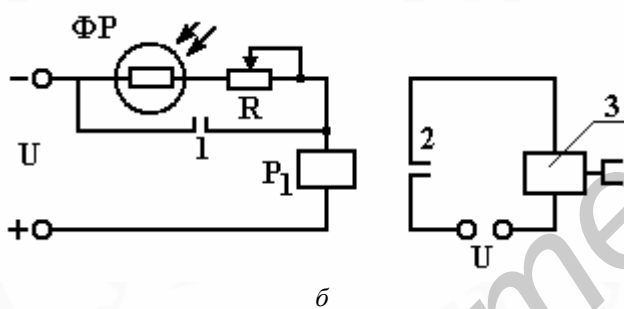
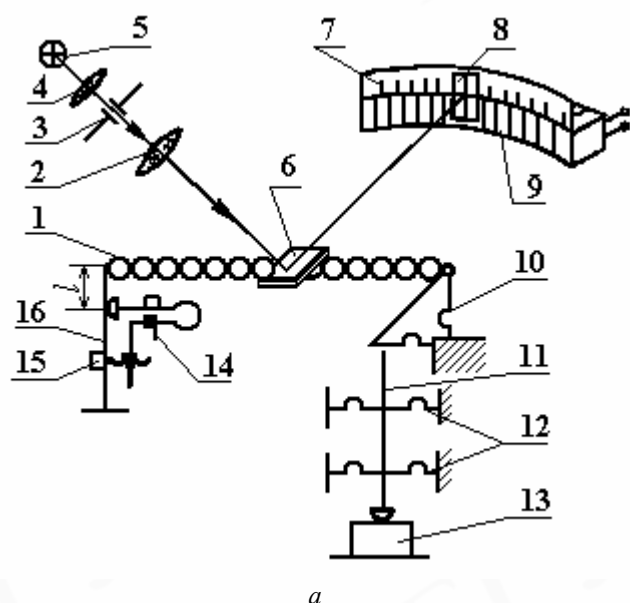
### 3.3 Фотоэлектрические преобразователи и приборы на их основе

Фотоэлектрические преобразователи широко используют в контрольно-сортировочных автоматах в качестве первичного преобразователя размера, измерителей перемещения в станках, координатных измерительных машинах и универсальных приборах (штангенприборах, микрометрах и индикаторных головках), а также для измерения углов.

Принцип действия фотоэлектрических приборов основан на преобразовании светового потока (от лампочки или лазера), проходящего через промежуточный измерительный элемент, в электрический сигнал с помощью фотоприемников. В зависимости от используемого промежуточного элемента преобразователи делятся на сортировочные (с вращающимся зеркалом), растровые (со штриховыми шкалами) и дифракционные (с дифракционными решетками).

Сортировочные фотоэлектрические преобразователи построены на базе пружинно-оптического механизма оптикатора (рисунок 3.12,а). Измерительный

стержень 11, соприкасающийся с деталью 13 и подвешенный на плоских пружинах 12 в виде мембран, поворачивает рычаг 10, который в свою очередь растягивает скрученную ленту 1, от чего поворачивается закрепленное на ней зеркальце 6. На это зеркальце проецируется световая метка с помощью источника света 5, конденсора 4, диафрагмы 3 и объектива 2.



*a* – принципиальная схема;  
*б* – схема подключения

Рисунок 3.12 – Преобразователь фотоэлектрический сортировочный

Отраженная световая метка 8 попадает на шкалу 7 и блок фоторезисторов 9. Число фоторезисторов определяет число размерных групп сортировки. Для регулировки цены деления используется винт 14, который изменяет плечо  $l$  плоской пружины 16. Установка нуля (тонкая настройка) производится винтом 15, который, деформируя плоскую пружину, изменяет натяжение скрученной ленты 1. Грубая настройка производится поднятием и опусканием преобразователя в стойке относительно столика, на котором устанавливается деталь.

Наличие шкалы облегчает настройку и обслуживание прибора. При попадании световой метки на любой фоторезистор его электрическое сопротивление резко уменьшается, что вызывает срабатывание порогового элемента (на рисунке 3.12, *б* реле  $P_1$ ), замыкание контактов 1 и 2 реле и выдачу команды на исполнительный элемент, например электромагнит сортировки 3.

По этой схеме построены фотоэлектрические преобразователи типа ПФС. Они различаются по числу групп сортировки – от 10 до 50. Важным показателем преобразователя является время установления выходного сигнала, которое составляет 0,1–0,2 с, что позволяет контролировать на автомате до 5–10 деталей в секунду.

В настоящее время для высокоточных измерений линейных и угловых перемещений в широких диапазонах (до 3 м) применяют растровые и дифракционные измерительные устройства. Основа растрового устройства – растр, представляющий собой стеклянную пластинку (пропускающий растр) или зеркальную металлическую пластину (отражательный растр), на которые нанесены параллельные непрозрачные штрихи с шагом  $q$  от 0,1 до 0,001 мм, причем обычно ширина штриха равна ширине прозрачного участка. Соотношение между шириной штриха  $b$  и шириной зрачка  $a$  может быть различным. Чаще применяются

растры, у которых ширина штриха равна ширине зрачка, т.е.  $a = b$  (измерительные растры), или ширина штриха во много раз меньше ширины зрачка, т.е.  $b \ll a$  (штриховые меры).

Растровое звено применяется в серийно выпускаемых преобразователях (рисунок 3.13). Основой преобразователя является сопряжение растров – измерительного 12 и индикаторных 7 и 11. Измерительный растр представляет собой совокупность темных штрихов, нанесенных на поверхность стеклянной пластины 6 с шагом  $q_1 = 4$  мкм. Ширина штрихов  $b$  и ширина зрачков  $a$  равны. Длина измерительного растра несколько больше диапазона измерений (10 мм). Измерительный растр жестко связан с подвижным стержнем 2, контактирующим с контролируемой деталью 1. Неподвижные индикаторные растры 7 и 11 подобны измерительному по шагу  $q_2 = 4$  мкм, но значительно меньше по длине. Растр 7 сдвинут по пространственной фазе на  $\pi/2$  относительно растра 11 для определения направления перемещения растра 12 и возможности деления шага растра на 4. Измерительный и индикаторный растры совмещены таким образом, что их штрихи параллельны.

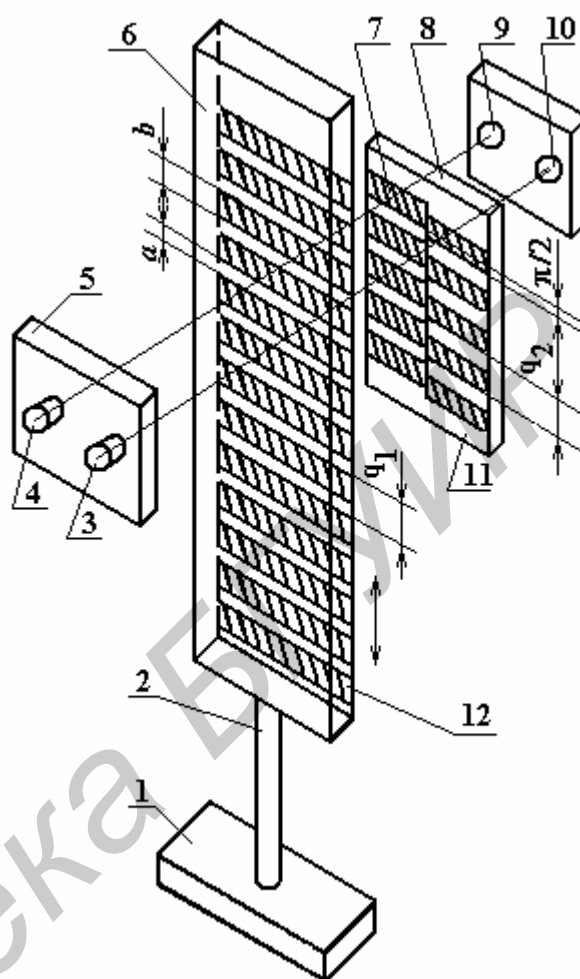


Рисунок 3.13 – Линейный растровый фотоэлектрический преобразователь

В этом случае при перемещении пластины 6 с измерительным растром 12 относительно пластины 8 с индикаторными растрами 7 и 11 в направлении, перпендикулярном к их штрихам, освещенность за растровым полем периодически изменяется (за один шаг растра 4 мкм проходят комбинационные светлая и темная полосы), вызывая синусоидальные (так предусмотрено конструкцией) колебания тока в фотоприемниках 9 и 10. Пространственный сдвиг растров 7 и 11 на  $\pi/2$  вызывает электрический сдвиг синусоидальных токов также на  $\pi/2$  в фотоприемниках 9 и 10, что позволяет осуществить деление шага 4 мкм на четыре (по схеме, изображенной на рисунке 3.14), т.е. получить дискретность отсчетного устройства 1 мкм. Подсветка растров осуществляется двумя светодиодами 4 и 3, расположенными на неподвижной плате 5.

Для обеспечения работоспособности растров с таким малым шагом в них реализуется безазорное сопряжение с помощью введения в контакт рабочих плоскостей растров (измерительного и индикаторного) слоя иммерсионной жидкости (кремнийорганический полиметилсилоксановый раствор). Этот слой жид-

кости позволяет также уменьшить оптические потери, обеспечить смазку трущихся поверхностей растров и выполняет роль демпфера, ограничивающего скорость перемещения.

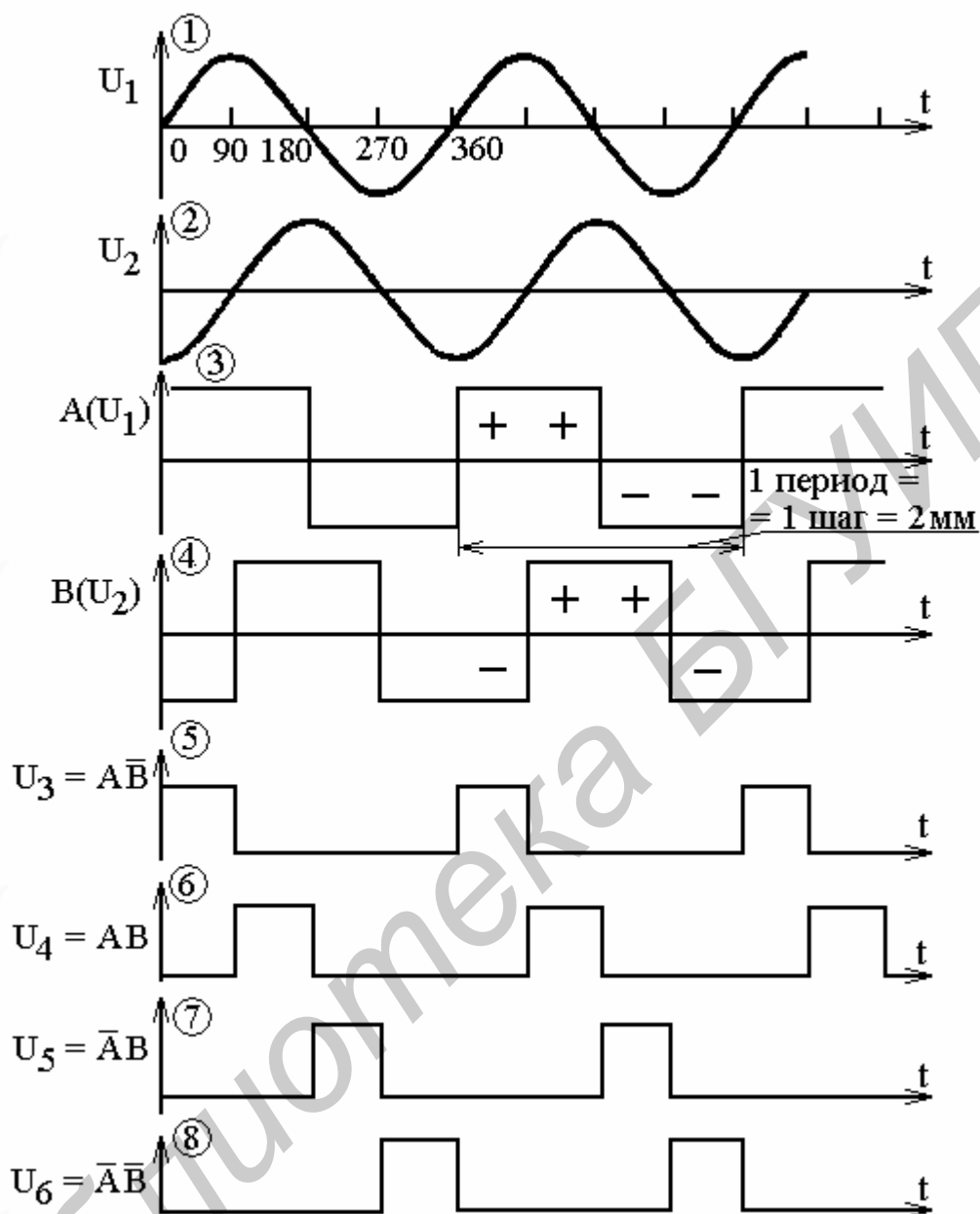


Рисунок 3.14 – Временные диаграммы перемещения с делением шага на 4

Рассмотрим круговой растровый фотоэлектрический преобразователь (рисунок 3.15). Он состоит из механического и оптоэлектронного узлов. Механический узел включает в себя микрометрический винт 1, преобразующий круговое вращение в продольное перемещение, Один оборот микрометрического винта соответствует шагу 1 мм.

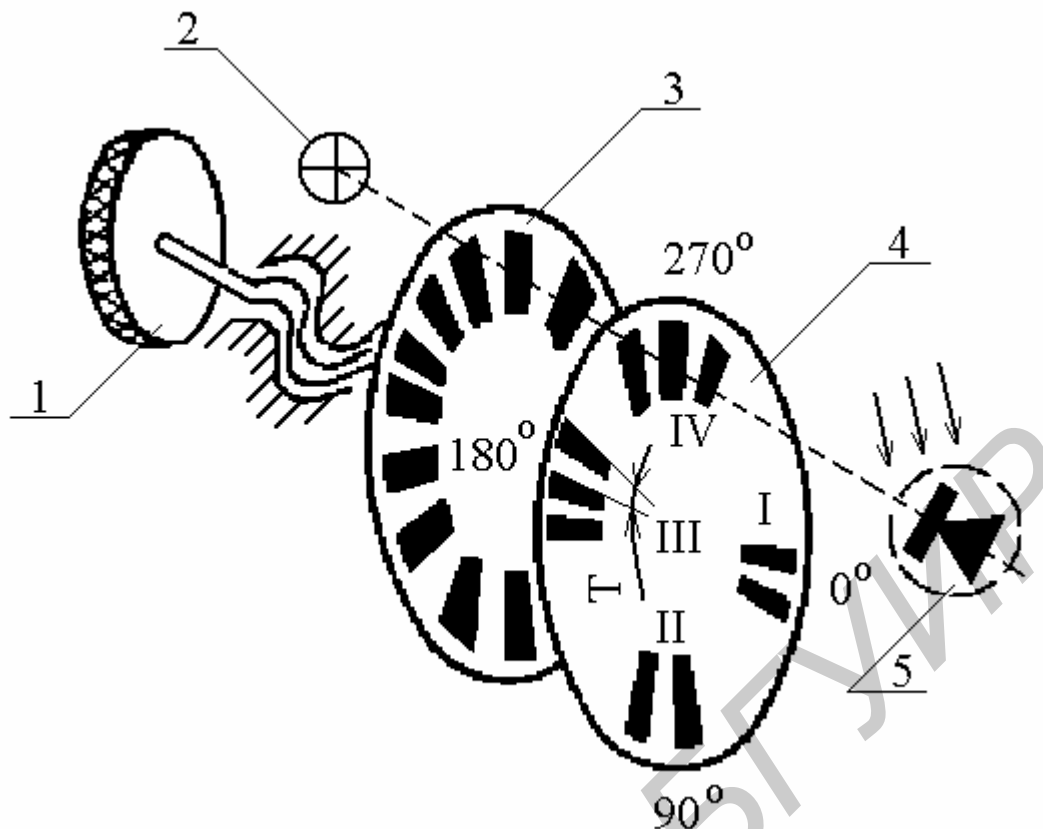


Рисунок 3.15 – Круговой растровый фотоэлектрический преобразователь

Оптоэлектронный узел содержит подвижный 3 и неподвижный 4 растровые диски, четыре источника света 2 и четыре фотоприемника. Подвижный растровый диск механически связан с микрометрическим винтом, имеет по окружности 1000 темных штрихов, чередующихся с прозрачными промежутками. На неподвижном растровом диске нанесены четыре группы штрихов, имеющие диаметрально противоположное расположение.

Штрихи группы II сдвинуты относительно штрихов группы I на  $90^\circ + T/4$ , штрихи группы III – на  $180^\circ + T/2$ , штрихи группы IV – на  $270^\circ + 3T/4$ , где  $T$  – шаг растрового диска. Подвижный и неподвижный растровые диски расположены соосно с небольшим расстоянием между ними.

При вращении микровинта поворачивается подвижный растровый диск относительно неподвижного, при этом освещенность за растровым полем периодически изменяется, вызывая синусоидальные колебания тока в четырех фотоприемниках с фазовыми сдвигами  $0^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $180^\circ$ ;  $270^\circ$ . Такие фазовые соотношения достигаются конструктивным взаимным сдвигом штрихов подвижного и неподвижного растровых дисков. Фазовые сдвиги  $0^\circ$  и  $180^\circ$  в одном канале и  $90^\circ$  и  $270^\circ$  – в другом позволяют уменьшить влияние взаимного эксцентриситета растровых дисков.

Электронный блок (на рисунке не показан) преобразует синусоидальный сигнал с фотоприемников в последовательность прямоугольных импульсов по двум каналам со сдвигом фаз  $90^\circ$  для определения направления вращения микровинта. Далее импульсы поступают на цифровой счетчик последовательного типа с дискретностью отсчета 1 мкм. При этом семидекадный цифровой счетчик

показывает в левой декаде знак « + » или « - », в трех следующих декадах – сотни, десятки и единицы миллиметров, а в трех последних – десятые, сотые и тысячные доли миллиметра.

Принцип цифрового отсчета на горизонтальном и вертикальном длинномерах, универсальном микроскопе, двух- и трехкоординатном измерительном приборе одинаков – здесь используются измерительные дифракционные решетки. Они выполнены в виде чередующихся элементов треугольного профиля и работают в проходящем или отраженном свете. Благодаря использованию решеток с шагом, сравнимым с длиной волны света, можно наблюдать полосы как в нулевом, так и в более высоких спектральных порядках дифракции. Полосы возникают в результате интерференции пучков различных порядков дифракции. Частота изменения освещенности на фотоприемниках определяется не только частотой решетки, но и спектральным порядком дифракции. Таким образом, она получается в несколько раз большей, чем частота решетки.

Дискретность отсчета, т.е. чередование полос на фотоприемнике, равна 0,5 мкм при использовании прозрачной решетки с 300 элементами треугольного профиля на миллиметре и отражательной с 600 элементами треугольного профиля на миллиметре.

Принципиальная схема фотозлектрического преобразователя на дифракционной решетке показана на рисунке 3.16.

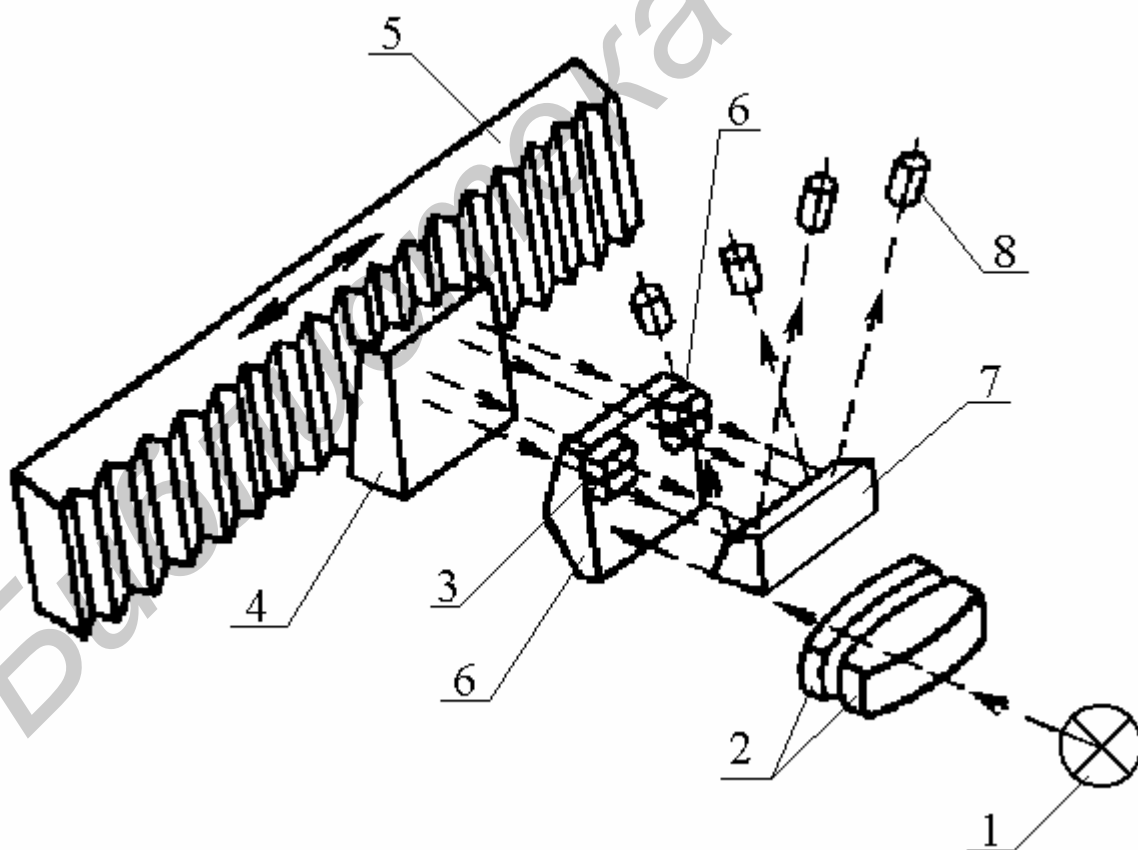


Рисунок 3.16 – Преобразователь линейных перемещений на дифракционных решетках

Свет от источника излучения 1 с помощью конденсора 2, образующего параллельный пучок лучей, направляется на оптический клин 3, который прелом-

ляет световой пучок. Пройдя прозрачную дифракционную решетку 4, свет падает на отражательную решетку 5 и, отражаясь от нее, вновь проходит прозрачную решетку 4, попадает на клин 3 и идет параллельно оптической оси. С помощью четырех линз 6, приклеенных к клину 3, и призмы – зеркала 7 световой поток разделяется на четыре части. В фокальной плоскости каждой линзы 6 находится фотоприемник 8. С каждой пары фотоприемников снимают два сигнала, сдвинутые один относительно другого по фазе на  $\pm 90^\circ$ , которые используются для определения направления движения.

При перемещении решетки 5, связанной с подвижной кареткой микроскопа, относительно прозрачной решетки 4, связанной с корпусом прибора, освещенность в плоскости фотоприемников 8 периодически изменяется, вызывая колебания тока. Преобразованный в импульсы ток поступает на восьмидекадный цифровой счетчик. Одна левая декада выделяется для знака «+» или «-», три следующих декады для сотен, десятков и единиц миллиметров, четыре последние декады – для десятых, сотых, тысячных и десятитысячных долей миллиметра.

### Контрольные вопросы

1 Назовите основные группы преобразователей, применяемых для измерения геометрических величин.

2 Что собой представляет вихретоковый преобразователь? На каком физическом явлении основан принцип его действия? Поясните его.

3 Каким образом реализуется фазовый метод выделения информации при использовании вихретоковых преобразователей? Приведите принципиальную схему включения преобразователя для реализации данного метода и временные диаграммы ее работы.

4 Как производится преобразование линейного перемещения вихретокового преобразователя в частоту? Приведите схему включения и поясните принцип действия.

5 Как реализуется амплитудный способ выделения измерительной информации с использованием вихретокового преобразователя? Приведите схему включения и поясните принцип ее действия.

6 В чем разница в конструкции и назначении предельных и амплитудных электроконтактных преобразователей?

7 В чем особенность электроконтактной головки, используемой в координатных измерительных машинах?

8 Как работает фотоэлектрический сортировочный преобразователь?

9 В каких приборах используют растровые фотоэлектрические преобразователи и каковы их основные технические характеристики?

10 Объясните принцип работы фотоэлектрического преобразователя на дифракционной решетке. Укажите, в каких приборах он используется.

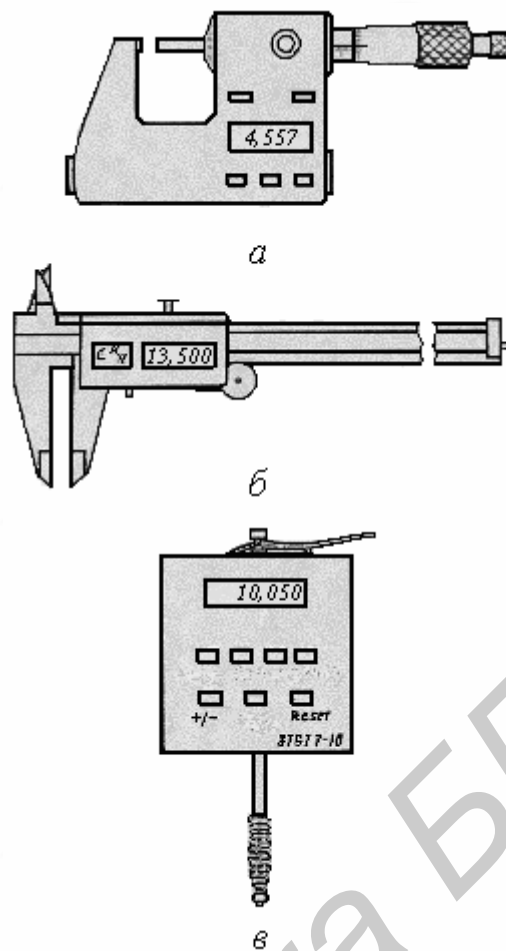


## 4 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В линейных и угловых измерениях можно выделить следующие группы средств измерений, которые отражают основные тенденции и этапы процесса автоматизации измерений: рабочие приборы операционного контроля; лабораторные приборы; приборы управляющего (активного) контроля; контрольно-сортировочные автоматы и сортировочно-комплектовочные машины; средства измерений в гибком автоматизированном производстве (ГАП), измерительные работы (ИР). В автоматизации рабочих цеховых и лабораторных приборов наметились два основных направления.

*Первое* направление проявляется в том, что универсальный прибор оснащается встроенным в него преобразователем, а также электронным блоком с устройством индикации или регистрации результатов измерений. Конструктивно электронный блок выполняется в виде отдельного блока, подключаемого к преобразователю либо встраиваемого в прибор. В последнем случае он имеет часто автономное питание от батареи. Приборы при этом приобретают новые функциональные возможности и качественные свойства. Они могут иметь меньшую цену деления, чем исходная модель; переключение цены деления с метрической системы на дюймовую; обнуление в любой точке диапазона измерения (т.е. начало отсчета может быть в любой точке диапазона измерения); запоминание результата измерений на определенное время, что необходимо при измерениях в труднодоступных местах; индикацию знака направления перемещения; аналоговый выход для присоединения к другим периферийным устройствам, в частности для обработки результатов измерений партии деталей и др. К ним относятся штангенприборы, глубиномеры, нутромеры, электронные уровни с числовым отсчетом (рисунок 4.1) и др. Причем традиционная конструктивная компоновка приборов, отработанная в течение десятилетий и отвечающая требованиям дизайна, в основном сохраняется.

*Второе* направление – создание приборов на базе преобразователя – индуктивного, растрового фотоэлектрического, пневматического. Такие приборы состоят из измерительной головки с преобразователем (имеющей стандартный присоединительный размер 28 или 8 мм) и электронного блока с устройством цифровой или аналоговой индикации. Для контроля отверстий применяют измерительные головки соответствующего диаметра с двумя наконечниками. Приборы могут иметь несколько переключаемых диапазонов измерений с разной ценой деления или дискретностью, обнуление, переключение направления отсчета, предустановку, стандартные аналоговый или цифровой выход работы с унифицированными устройствами обработки информации и ЭВМ, возможность дифференциальных измерений с двумя преобразователями, установку границ допуска и сигнализацию при выходе измеряемого размера за границы допуска, информацию о размерной группе при сортировке деталей и др. К этой группе приборов можно отнести индуктивные и фотоэлектрические измерительные системы, растровые измерительные головки, пневматические приборы и многие другие.



- a* – микрометр фирмы «Митутойо»;  
*б* – штангенциркуль фирмы «EMР»;  
*в* – растровая головка фирмы «EMР» (ФРГ)

Рисунок 4. 1 – Приборы для измерения геометрических величин с цифровым отсчетом

Таким образом, если в традиционных универсальных приборах линейное или угловое перемещение преобразовывалось в измерительный сигнал механическим или оптико-механическим способом и результат считывался оператором с жестких цифровых шкал, то при автоматизации приборов это преобразование осуществляется электрическим (пневматическим) способом, а считывание результатов измерений оператором производится с электронных устройств регистрации и индикации, таких как микроамперметры, унифицированные цифровые индикаторы, светодиодные шкалы, экранные дисплеи, самописцы, графопостроители и др. Функции оператора остаются практически такими же, что и при работе с традиционными приборами. Более высокий уровень автоматизации предполагает автоматическое выполнение операций, совершаемых ранее оператором. К таким относятся: замена ручного базирования детали (меры) относительно координатной системы прибора электрическим (в кругломере) или математическим (в КИМ); перемещение кареток, визирной системы, измерительных головок с помощью электродвигателей; выработка команды для снятия отсчета;

снятие отсчетов, их запоминание; обработка результатов измерения; оформление протоколов измерений и свидетельства; информирование оператора в диалоговом режиме о порядке действий в зависимости от поставленной им задачи в соответствии с разветвленной программой; управление процессом измерения; введение режимов самопроверки; внесение поправок в результаты измерения и др.

#### **4.1 Координатные измерительные машины**

Трехкоординатные приборы позволяют решить ряд новых задач измерительной техники, которые ранее традиционными методами или вовсе не решались, или были трудоемкими и тем самым тормозили развитие производственного процесса. Появилась необходимость ввести такие способы контроля, которые будут соответствовать темпам обработки. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) позволили значительно повысить производительность обработки, но надежда обойтись без контроля обрабатываемых на них деталей не оправдалась. Необходимо проверить состояние и наладку станков с ЧПУ, контролируя первую изготовленную деталь. Причем часто эти детали сложной пространственной формы с большим количеством размеров: блок цилиндров двигателя, корпусные детали, штампы и др.

Принцип действия трехкоординатных приборов (в дальнейшем координатных измерительных машин – КИМ) основан на возможности измерять перемещение щупа преобразователя относительно контролируемой детали (или, реже, детали относительно щупа) по трем пространственным координатам  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Отсчет по этим координатам выполняется в цифровой форме. Так как при измерении линейных и угловых величин ряд размеров и размерных параметров может быть получен только путем вычислений, а также для получения результатов измерений в удобной форме (в виде протоколов и графиков) в сочетании с КИМ использована ЭВМ (чаще микро- и мини-ЭВМ). На ЭВМ и периферийные устройства (дисплей, принтеры и другие) перекладываются наиболее трудоемкие операции контроля деталей сложной пространственной формы: вычисление, установка детали и щупов относительно баз, составление протоколов. На КИМ можно измерять в любой из трех систем прямоугольных координат: в машинной, соответствующей осям, по которым перемещается щуп; в нормальной системе, соответствующей осям детали (деталь при установке чаще бывает смещена по трем координатам относительно осей машинной системы); вспомогательной, которая у некоторых типов деталей может быть смещена по трем координатам относительно нормальной системы (эта система используется при измерении элементов, расположенных на наклонных поверхностях детали). Благодаря использованию в КИМ ЭВМ пересчет из одной системы в другую осуществляется автоматически без участия человека. КИМ с ЭВМ позволяют заменить трудоемкое ручное базирование на так называемое математическое.

Основными конструктивными элементами КИМ являются: механическая часть, обеспечивающая установку контролируемой детали и ее перемещение относительно системы ощупывания и, наоборот, системы ощупывания относительно любой точки неподвижной детали; система ощупывания, фиксирующая касание щупом заданной точки детали; измерительная часть, измеряющая перемещение стола или системы ощупывания по каждой из координат; система при-

вода и управления перемещениями подвижных органов КИМ и щуповой системы; система обработки результатов измерений.

Механическая часть КИМ определяется габаритными размерами и формой контролируемых деталей и возможностями ощупывающей системы. По конструкции механическая часть может быть консольной, порталной или мостовой. Консольная конструкция (рисунки 4.2,*а,б*) облегчает установку и контроль детали, однако жесткость такой конструкции и координатные перемещения наименьшие – до 500 мм. При перемещении по оси *Y* появляются наклон и поворот консоли, которые необходимо компенсировать тем или иным способом. На рисунке 4.2,*а* деталь установлена на неподвижный стол. На рисунке 4.2,*б* деталь установлена на подвижный по координате *X* стол.

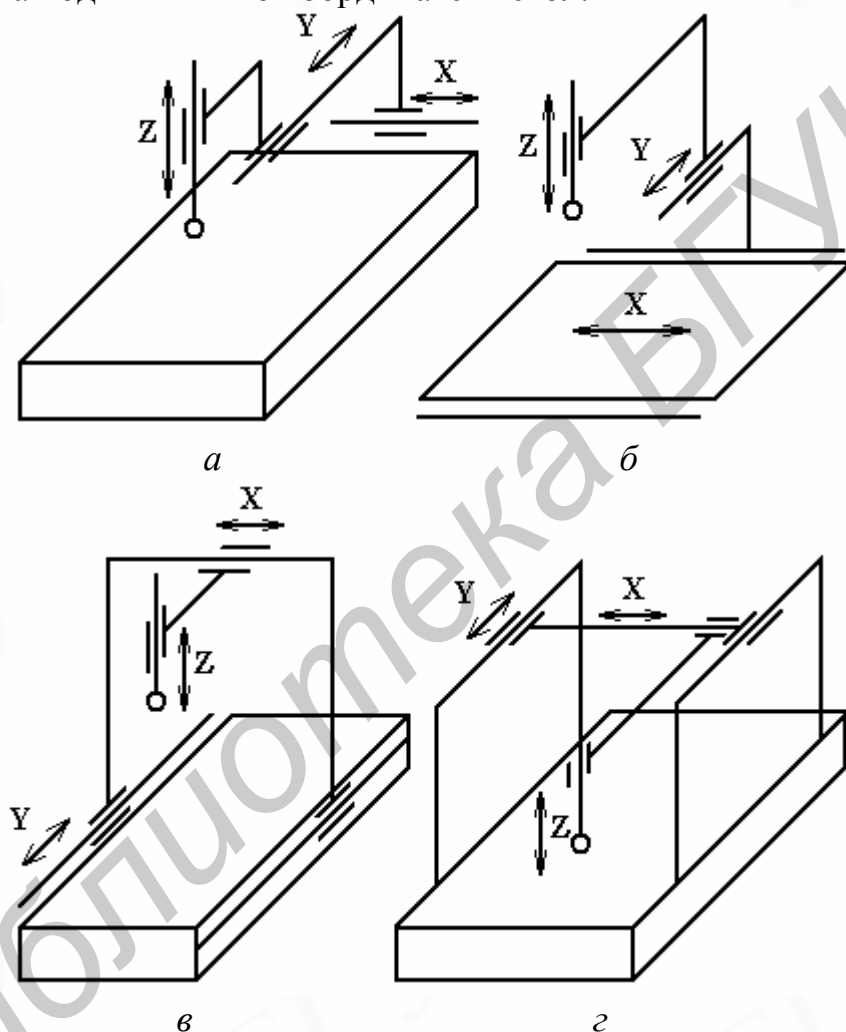


Рисунок 4.2 – Конструкции механической части КИМ

Портальная конструкция механической части является сочетанием портала и консоли (рисунок 4.2,*в*) и обеспечивает более высокую жесткость и координатные перемещения до 1 500 мм. При этом сохраняется удобство загрузки детали (во время загрузки портал отводится).

Мостовая конструкция представляет собой консоль между двумя порталами (рисунок 4.2,*г*) и обладает наибольшей жесткостью и возможностью координатных перемещений до 10 м. Однако наличие в мостовой конструкции боковых колонн ограничивает доступ к детали и снижает диапазон измерений. От габаритных размеров и массы детали зависит также и выбор перемещающихся эле-

ментов КИМ.

Тяжелые, громоздкие детали устанавливаются на массивный неподвижный стол. При измерении легких, небольших деталей отдают предпочтение столам, перемещающимся по одной (X) или двум (X и Y) координатам. Стол и направляющие изготовляют из серого чугуна, стального литья, а в последнее время из твердых каменных пород (диабаз или гранита).

Система ощупывания определяется и параметрами детали, и процессом измерения. Выбор метода ощупывания (формы контактирующего элемента и принципа действия головки) зависит от множества факторов, связанных с деталью и задачей измерения, и в свою очередь влияет на точность измерения, условия обслуживания КИМ, возможную степень автоматизации и производительность. Применяемые щуповые головки по принципу действия делятся на механические, электроконтактные, индуктивные и др. Механические щупы жестко крепятся в подвижной пиноли и имеют различную форму: конусный наконечник применяют для определения расстояния между отверстиями; сферический – для измерения плоских цилиндрических или выпуклых поверхностей; плоский – для измерения выпуклых поверхностей; дисковый – для измерения глубоких отверстий или внутренних канавок и т.д. В сочетании с жесткими наконечниками используются различные удлинители и крепежный кубик (сфера) на конце пиноли, обеспечивающий установку щупа в выбранном направлении. Жесткие щупы применяют при ручном ощупывании и управлении. При этом измерительное усилие и положение контакта зависят от усилия рук. Отсчет производится при стабилизации показания на отсчетном приборе. Электроконтактные щупы основаны на использовании замыкания токовой цепи в момент контакта щупа с деталью. При этом выдается звуковой (зуммер) и световой сигнал на снятие отсчета. Такой щуп малонадежен и неприменим при измерениях токонепроводящих деталей. Другим вариантом электроконтактного щупа является электроконтактный преобразователь, замыкающий или размыкающий электрические контакты в момент касания.

Использование ЭВМ в сочетании с КИМ создало предпосылки для полной автоматизации процесса измерения, сдерживаемой необходимостью смены щупов, поскольку сложность геометрической формы деталей и труднодоступность точек измерения требуют применения различных щупов. Весьма универсальным является набор наконечников из пяти штук типа «еж», соединенных в одном корпусе. Каждый наконечник чувствителен к перемещению по трем осям (X, Y и Z), благодаря применению в конструкции трех индуктивных преобразователей. Эта щуповая система может использоваться и как индикатор касания (нуль-индикатор) – в этом случае измерения перемещения щупа выполняются измерительной частью КИМ, и как индикатор отклонения – в этом случае измерения малых перемещений наконечника выполняются системой ощупывания с помощью индуктивного преобразователя, а результаты с соответствующим знаком суммируются с показаниями измерительной части КИМ, причем суммирование производится до обработки результатов измерений.

Измерительная часть служит для измерения перемещений щупов или стола в трех координатах рабочего пространства КИМ. Конструктивно она может быть

фотоэлектрической (растровой или на дифракционных решетках); линейной или круговой индуктосинной; лазерной. Привод и управление КИМ определяют производительность, точность и удобство обслуживания. Ручной подвод пинולי к месту измерения применяется в КИМ с малыми диапазонами измерений и неавтоматизированных. При этом возрастают погрешности из-за влияния температуры руки оператора и нестабильности измерительного усилия. При моторном приводе применяются два варианта управления – цифровое перфорационное через управляющие блоки и программное управление от ЭВМ, используемое также для обработки результатов измерений.

Универсальность и возможности КИМ в значительной степени определяются системой обработки данных. Если в КИМ не используется ЭВМ, то запись результатов измерений и необходимые расчеты в соответствии с чертежом должен выполнять оператор. Первая ступень автоматизации достигается за счет подключения печатающего устройства, однако размеры детали на чертеже должны быть заданы в значениях координат. Вторая ступень автоматизации – применение ЭВМ для вычислений и распечатки протоколов, третья ступень автоматизации – полностью автоматизированные КИМ. В них осуществляется автоматический ввод программы управления и обработки результатов измерений, автоматическое управление подвижными узлами КИМ, автоматическая обработка результатов измерений и их оценка. Все эти задачи решаются путем составления программ для ЭВМ в составе КИМ.

По назначению программы можно разделить на четыре группы. Первая группа – программы поверки. Перед измерением в ЭВМ задаются параметры щупа (диаметр наконечника, длина и т.д.) или щуповые головки калибруются по определяющей нормали (сфера или куб в рабочем пространстве КИМ). ЭВМ рассчитывает дифференциальные координаты, радиусы наконечников и упругую деформацию щупов. Таким образом, при поверке компенсируются погрешности, возникающие при ощупывании. Вторая группа – программы автоматической ориентации, обеспечивающие компенсацию несовпадения осей детали с осями машины в трех координатах. Эти программы позволяют контролировать детали в любом пространственном положении. Третья группа – программы измерений. Они включают в себя: регистрацию координат точки контакта с деталью; программу трехточечного, четырехточечного и многоточечного контакта с внутренним или наружным цилиндром; сравнение номинальных и действительных размеров; выдачу результатов измерений линейных или угловых перемещений между двумя значениями координат. Использование программ третьей группы позволяет определять положения кромок поверхности по трем или нескольким точкам; соосность отверстий; угол между двумя плоскостями; направления осей и диаметров внутреннего и наружного цилиндров; наружных и внутренних конусов; точек симметрии; нахождение точек пересечения трех плоскостей; определение угла между ребрами трех пересекающихся плоскостей и хода плоской и пространственной кривой и др.

КИМ модели ТИП-1 (ЛЮМО) имеет консольную конструкцию механической части (рисунок 4.3). Продольная каретка 6 является рабочим столом, на котором закрепляется измеряемая деталь. Поперечная каретка 4 несет на себе вер-

тикальную каретку 5, на которой устанавливаются ощупывающие устройства – трехкоординатный индикатор контакта или оптический визирный микроскоп. Перемещение кареток производится автоматически приводами, содержащими электродвигатель, редуктор и шариковую винтовую пару. Направляющие крепятся на аэростатических подшипниках.

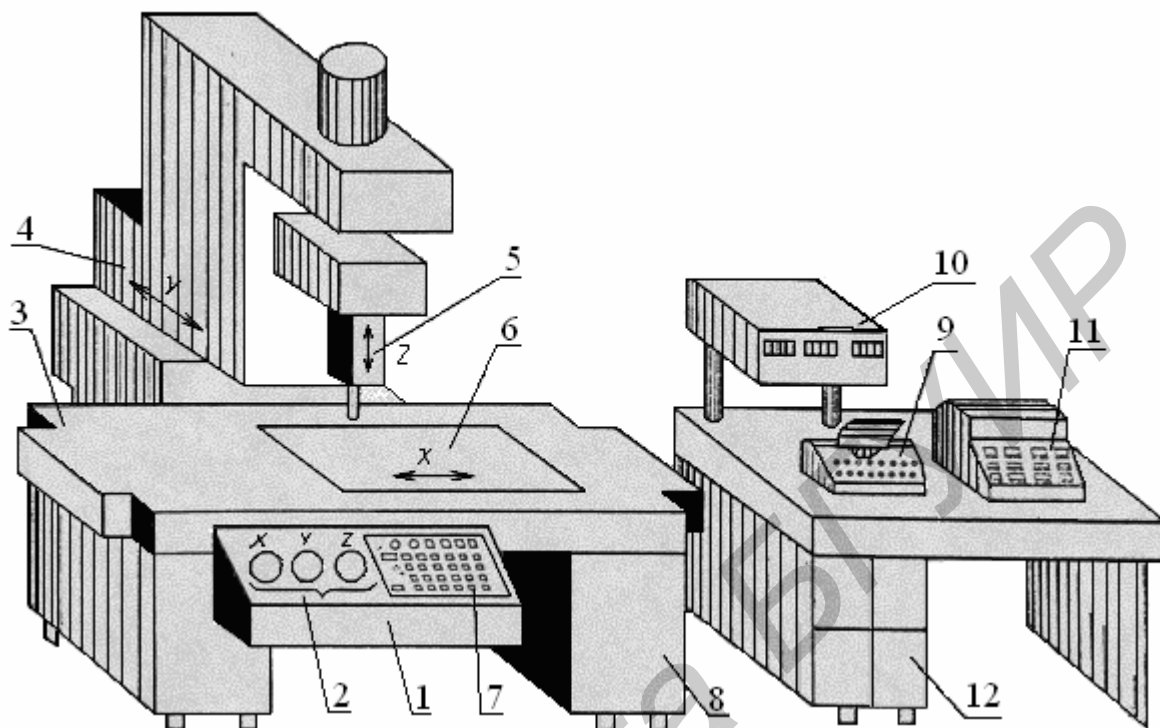


Рисунок 4.3 – Координатная измерительная машина модели ТИП-1

В измерительной части используется преобразователь линейных перемещений (ПЛП) на дифракционных решетках. На передней панели прибора 1 расположены пульт управления перемещениями 2 (по трем координатам с помощью ручных органов управления) и пульт программного управления 7 (задание программ измерения и обработки результатов измерений). Пульт программного управления состоит из операционной группы клавишей (со сменными трафаретами), числовой группы и группы клавишей измерения. В состав ТИП-1 входят также ЭВМ 11, печатающее устройство 9, цифровой индикаторный блок 10 и пневмошкаф 12. Пневмошкаф осуществляет подачу сжатого воздуха в аэростатические подшипники направляющих и три виброгасящие пневматические опоры станины 3, установленной на двух тумбах 8.

Измерение деталей может производиться в ручном и автоматическом режимах. В автоматическом режиме программа измерений создается в операции «Обучение» при ручном измерении первой детали из партии. При этом в мини-ЭВМ вводятся координаты контролируемых точек; точек изменения траектории перемещения кареток; задаваемую оператором последовательность расчета и форма протокола. В ТИП-1 используется специальный язык программирования ПИЛУР (программа измерения линейных и угловых размеров). Простые задачи измерения реализуются с пульта программного управления. Более сложные программы измерения составляет программист на основании чертежа детали; при

этом он пользуется только тринадцатью символами: точкой, прямой, плоскостью, сферой, цилиндром, конусом, координатами деталей, расстоянием, диаметром, радиусом, углом, отклонением от перпендикулярности и параллельности. После составления программа вводится в память мини-ЭВМ на магнитную кассету, при этом оператор одновременно ощупывает контролируемые точки измеряемой детали в последовательности, указанной программистом на чертеже.

КИМ модели ТИП-1 имеет следующие характеристики:

- диапазон измерений по координатам X, Y и Z 315×160×160 мм;
- дискретность отсчета 0,5 мкм;
- предел допускаемой погрешности по координатам  
 $\Delta_x = \pm(1,9 + L/500)$  мкм,  $\Delta_y = \pm(1,7 + L/400)$  мкм,  $\Delta_z = \pm(1,9 + L/400)$  мкм,  
 где L – контролируемый размер в мм;
- среднее квадратическое отклонение результата измерения не более 0,5 мкм;
- скорость перемещения кареток от 25 мкм/с до 25 мм/с.

#### 4.2 Электронные уровни

Электронные уровни предназначены для измерения малых углов, а также для измерения прямолинейности и плоскостности. Они выполняются с емкостными или индуктивными первичными преобразователями с цифровой и аналоговой индикацией результатов измерений.

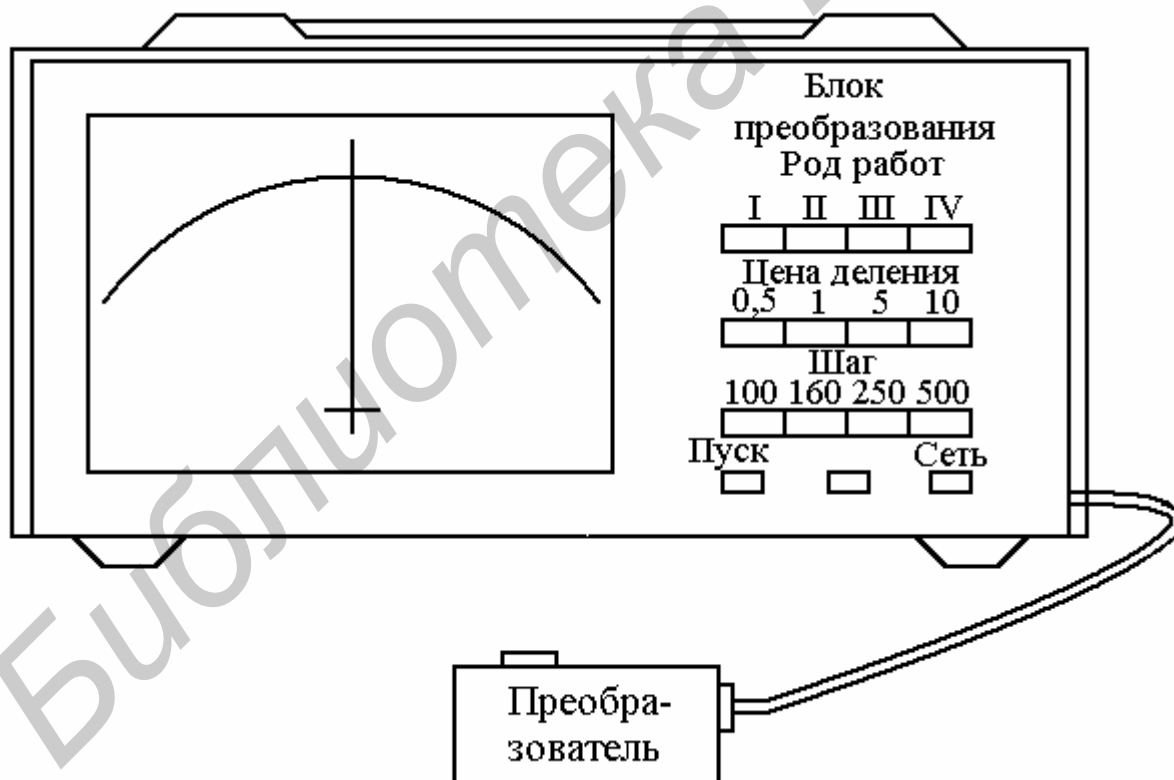


Рисунок 4.4 – Общий вид электронного уровня модели «Микрад»

Электронный уровень модели «Микрад» состоит из двух преобразователей и блока преобразования измерительной информации (рисунок 4.4). Уровень используется в комплекте с микронивелиром МН-2.

При измерениях прямолинейности преобразователь устанавливается на основание микронивелира с соответствующим расстоянием между опорами. Чувствительным элементом преобразователя (рисунок 4.5) является пузырьковая



ампула 1, на которой наклеены полоски фольги 4, образующие дифференциальный конденсатор. Ампула подвешена на торсионной пружине 8 и может изменять свое угловое положение относительно основания. На концах ампулы приклеены катушки 3, которые с постоянными магнитами 2, закрепленными на корпусе, образуют электромагнитную систему преобразователя.

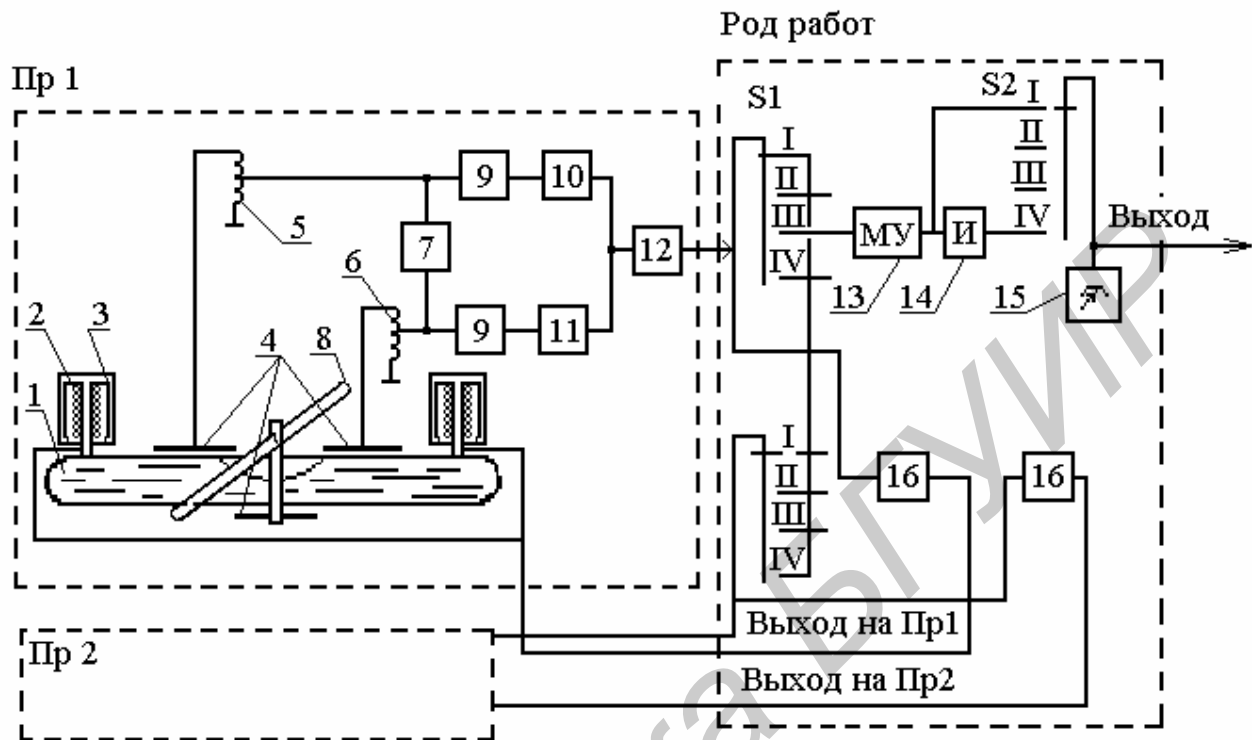


Рисунок 4.5 – Чувствительный элемент электронного уровня «Микрад»

Емкости дифференциального конденсатора 4 подключены к катушкам индуктивности 5 и 6, образуя колебательные контуры, питаемые от генератора тока 7 частотой 5 МГц. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) контуров идентичны и настроены таким образом, что частота генератора совпадает с одним из скатов АЧХ (сплошная кривая на рисунке 4.6). При равенстве емкостей дифференциального конденсатора, т.е. при симметричном расположении пузырька в ампуле, напряжения, снимаемые с катушек 5 и 6 (см. рисунок 4.5), равны ( $U_f$ ).

При наклоне ампулы на некоторый угол пузырьки перемещаются вдоль ампулы, что вызывает изменение диэлектрической проницаемости и, следовательно, емкости одного конденсатора в сторону увеличения, а другого – в сторону уменьшения. При этом АЧХ контуров разойдутся (пунктирные линии на рисунке 4.6) и напряжения, снимаемые с катушек ( $U_{f1}$ ,  $U_{f2}$ ), перестанут быть равными. Напряжения  $U_{f1}$ ,  $U_{f2}$  (см. рисунок 4.5) поступают в амплитудные детекторы 9 и фильтры низкой частоты 10, 11 (где выделяется огибающая электрического сигнала  $U_{f1}$ ,  $U_{f2}$ ), а затем в операционный усилитель (ОУ) 12. Выходной сигнал ОУ поступает в блок преобразователя, где усиливается усилителем мощности 16 и подается в катушки электромагнитных систем преобразователя, что приводит к возврату ампулы в состояние, близкое к исходному.

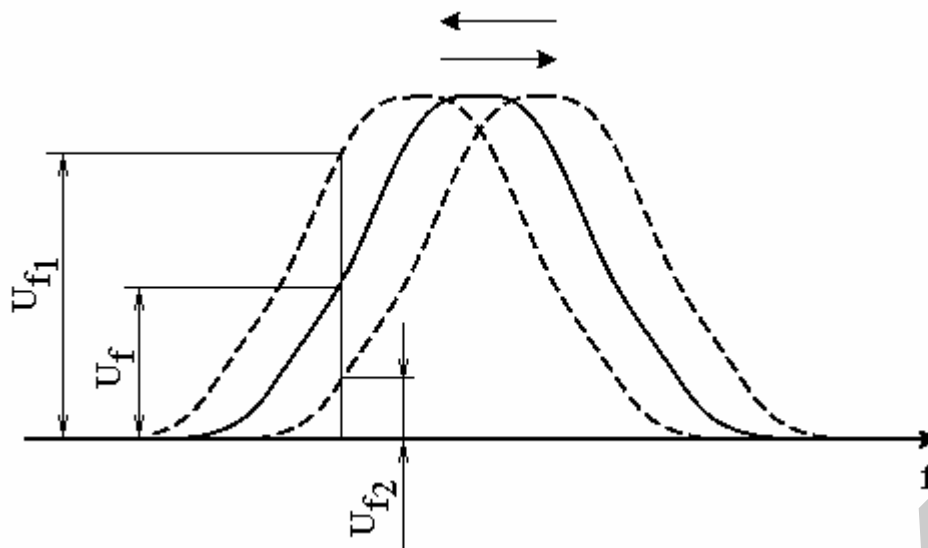


Рисунок 4.6 – Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) контуров, входящих в состав электронного уровня «Микрад»

Таким образом, преобразователь работает как аналоговый прибор следящего уравнивания с замкнутой структурной схемой. Для осуществления процесса уравнивания используется разностная величина  $\Delta\alpha = \alpha - \beta$ , где  $\alpha$  – угол наклона основания уровня;  $\beta$  – угол компенсации наклона ампулы, создаваемый моментом сил электромагнитной системы. Блок преобразования имеет входы для двух преобразователей Пр 1 и Пр 2. При положении I, II и III переключателей S1, S2 («Род работы») измеряются углы, при положении IV – прямолинейность. В положении переключателей III и IV в масштабный усилитель (МУ) 13 поступает сумма сигналов обоих преобразователей, и тогда прибор измеряет разность углов наклона первого и второго преобразователей. При измерении углов измерительный сигнал после МУ подается через переключатель S2 на показывающий прибор – микроамперметр 15, проградуированный в угловых и линейных единицах (угловые секунды и микрометры). При измерении прямолинейности сигнал с МУ 13 поступает через интегратор (И) 14 на показывающий прибор. В узле интегратора осуществляются операции определения  $h_i$  и  $U_i$  (рисунок 4.7):

$$h_i = l \sin \beta_i = 4,8 \cdot 10^{-6} l \beta_i,$$

где  $l$  – расстояние между опорами уровня;

$\beta$  – уровень компенсации на участке с номером  $i$ ;

$h_i$  – величина, определяющая положение точек с номером  $i$  измеряемого профиля по отношению к предыдущей точке;

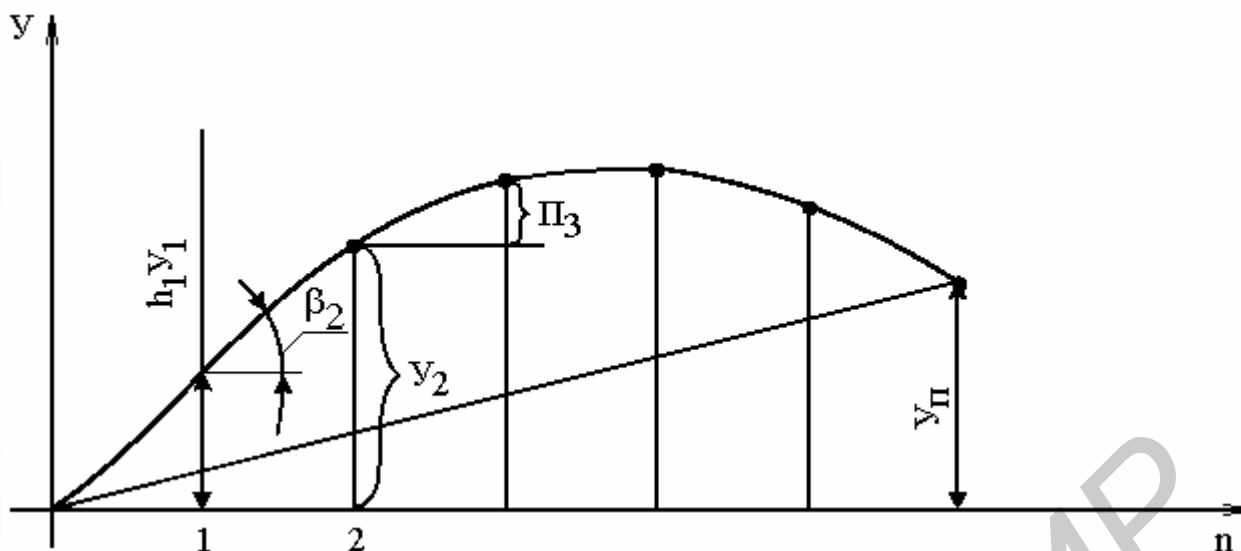


Рисунок 4.7 – Уровень «Микрад». Операции определения  $h_i$  и  $y_i$

Координата точки профиля с номером  $i$  в выбранной системе координат определяется по формуле

$$y_i = \sum_{i=0}^l h_i .$$

Интегратор работает в двух режимах: интегрирования и запоминания. Интегратор подключается к МУ на несколько секунд с помощью контактов реле (на рисунке не показаны), управляемых кнопкой «ПУСК». На это время интегратор находится в режиме интегрирования и рассчитывается  $Y_i$ . Затем он автоматически отключается от МУ и переходит в режим запоминания, а измерительный сигнал с его выхода поступает на показывающий прибор.

Пределы измерения по шкале  $\pm 25$ ;  $\pm 50$ ;  $\pm 250$  и  $\pm 500''$ ; предел допускаемого значения систематической составляющей приведенной погрешности 4 %; предел допускаемого значения среднеквадратического отклонения (СКО) случайной погрешности 0,5; 1; 4 и 8''.

### 4.3 Кругломеры с управлением от ЭВМ

Кругломеры предназначены для определения отклонений формы цилиндрической поверхности. Уже первые модели кругломеров относились к полуавтоматическим приборам. Принцип работы их заключается в том, что деталь и измерительный наконечник индуктивного преобразователя находятся в относительном движении по правильной окружности, создаваемом шпинделем образцового вращения. Отклонения профиля детали в радиальном направлении преобразуются в электрический сигнал, который после обработки в аналоговой форме в электронном блоке записывается самописцем в полярной системе координат в виде круглограммы с выбранным увеличением. Числовое значение отклонения от круглости определяется оператором по круглограмме. Дальнейшее развитие этой группы приборов и оснащение их микроЭВМ позволили перейти к цифровой форме обработки измерительного сигнала, что существенно расширило функциональные возможности приборов.

Программно-математическое обеспечение позволяет: проводить базовую среднюю окружность на круглограмме, вычислять отклонение от круглости от-

носителю нее и прилегающей окружности; выполнять центрирование детали относительно оси вращения шпинделя; собирать и хранить массив данных, характеризующих контур детали; исключать из массива данных систематические погрешности биения шпинделя и остаточного эксцентриситета установки детали; выполнять гармонический анализ контура детали с нахождением амплитуд и фаз гармоник; регистрировать сигнал полярным самописцем с исключением некоторых гармоник и без их исключения; вычислять длину опорной линии на заданной высоте профиля ( $tp$ ), максимальную и среднюю арифметическую крутизну профиля; выполнять аттестацию точности вращения шпинделя; выполнять тест-проверки некоторых характеристик прибора и др.

Схема кругломера представлена на рисунке 4.8. На столе 4 устанавливается деталь 5 и центрируется посредством винтов 3. Индуктивный преобразователь 6, установленный на кронштейне 7, преобразует колебания щупа на неровностях поверхности исследуемой детали в сигнал, модулированный по амплитуде.

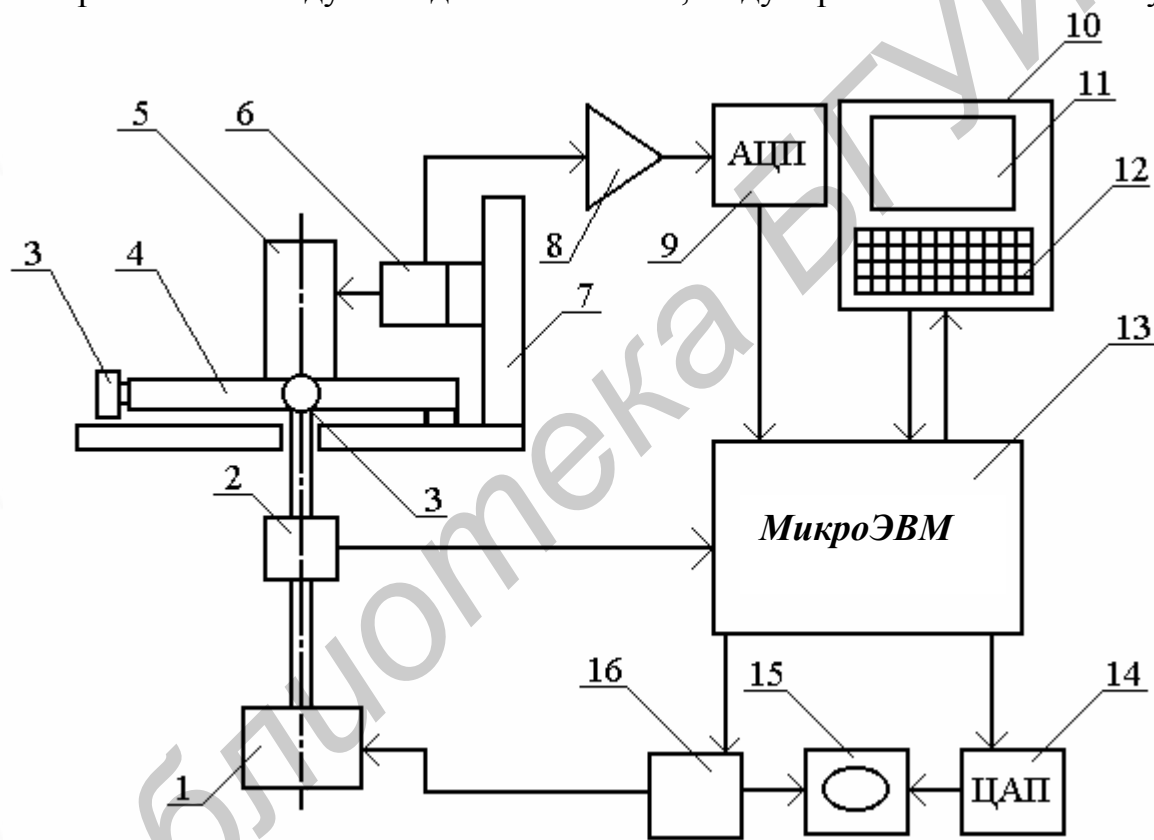


Рисунок 4.8 – Структурная схема кругломера

Сигнал после усиления в блоке 8 преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем 9 и поступает в память микроЭВМ 13 по командам, которые формируются с помощью импульсов от преобразователя угла 2. Например, если преобразователь выдает 512 импульсов за один оборот ( $\text{шаг } 360^\circ \cdot 60/512 = 42'$ ), то 512 значений измерительного сигнала запишутся в массив данных ЭВМ. По программам, введенным в память ЭВМ, обрабатываемая измерительная информация и результаты выводятся на дисплей 11 пульта управления 10 по командам оператора. Команды, а также цифровую информацию оператор вводит с клавиатуры 12. Для графической записи круглограммы на самописец 15 подается сигнал в аналоговом виде, сформирован-

ный цифроаналоговым преобразователем 14 в соответствии с программой, заложенной в микроЭВМ. При этом может вноситься коррекция коэффициента увеличения, устраняться систематическая погрешность биения шпинделя 1, производится цифровая фильтрация измерительного сигнала (т.е. исключение неравномерности заданной частоты вращения). Синхронизация вращения шпинделя и самописца осуществляется блоком управления 16.

Кругломеры, оснащенные ЭВМ, работают в диалоговом режиме с оператором. Оператор включает прибор, устанавливает деталь на столе прибора, центрирует ее, далее нажимает клавишу «List» на клавиатуре. На экране появляется перечень возможных операций, например выбор базовой окружности. Сам компьютер выбирает среднюю окружность и метрические единицы измерения. Если оператор согласен с этим, он выбирает вид поверхности измерения (наружная поверхность, внутренняя поверхность) и нажимает соответствующую клавишу. Если шпиндель включен, то сразу начинается измерение, если же нет – то на экране появляется указание: «установите скорость вращения шпинделя 6 об/мин, нажмите клавишу ПУСК. По окончании измерений на экране появляется круглограмма с числовым значением отклонения от окружности, средняя окружность и координаты ее центра относительно оси вращения шпинделя (рисунок 4.9).

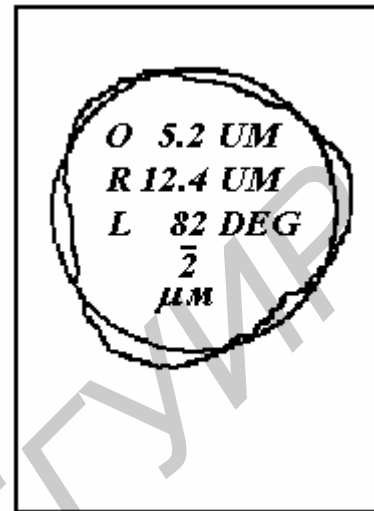


Рисунок 4.9 – Круглограмма с числовыми значениями отклонений от окружности

Процесс автоматического электрического базирования рассмотрим на примере центрирования в аналоговой форме при записи круглограммы на кругломере. Измерительный сигнал, полученный с индуктивного преобразователя, после усиления, детектирования и фильтрования фильтром низких частот можно представить в виде уравнения (ряда Фурье):

$$L(\theta) = R + x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta + x_2 \sin 2\theta + y_2 \cos 2\theta + \dots,$$

где  $\theta$  – угол поворота шпинделя;

$x_1 \sin \theta; y_1 \cos \theta$  – составляющие сигнала, вносимые эксцентриситетом детали;

$x_1$  и  $y_1$  – координаты нецентрирования.

При записи круглограммы необходимо исключить из сигнала составляющие  $R, x_1 \sin \theta, y_1 \cos \theta$ . Известно, что значения  $R, x_1, y_1$  выражаются как

$$R = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} L(\theta) d(\theta);$$

$$x_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} L(\theta) \sin \theta d\theta; \quad y_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} L(\theta) \cos \theta d\theta.$$

Следовательно, для выполнения операций потребуются следующие блоки: формирования сигналов  $\sin \theta$ ,  $\cos \theta$ ; множительное устройство (МУ); интеграторы (И); сумматор  $\Sigma$ .

На рисунке 4.10 представлена схема центрирования, включающая в себя схему управления, балансные амплитудные модуляторы и записывающий прибор (ЗП). В балансных модуляторах измерительный сигнал преобразуется в модулированный по амплитуде сигнал частотой 10 кГц и подается в множительное устройство. В МУ сигнал умножается на другой сигнал той же частоты прямоугольной формы, поступающий из схемы управления, модулированный по фазе, изменяющейся по линейному закону от 0 до 360° за один оборот шпинделя.

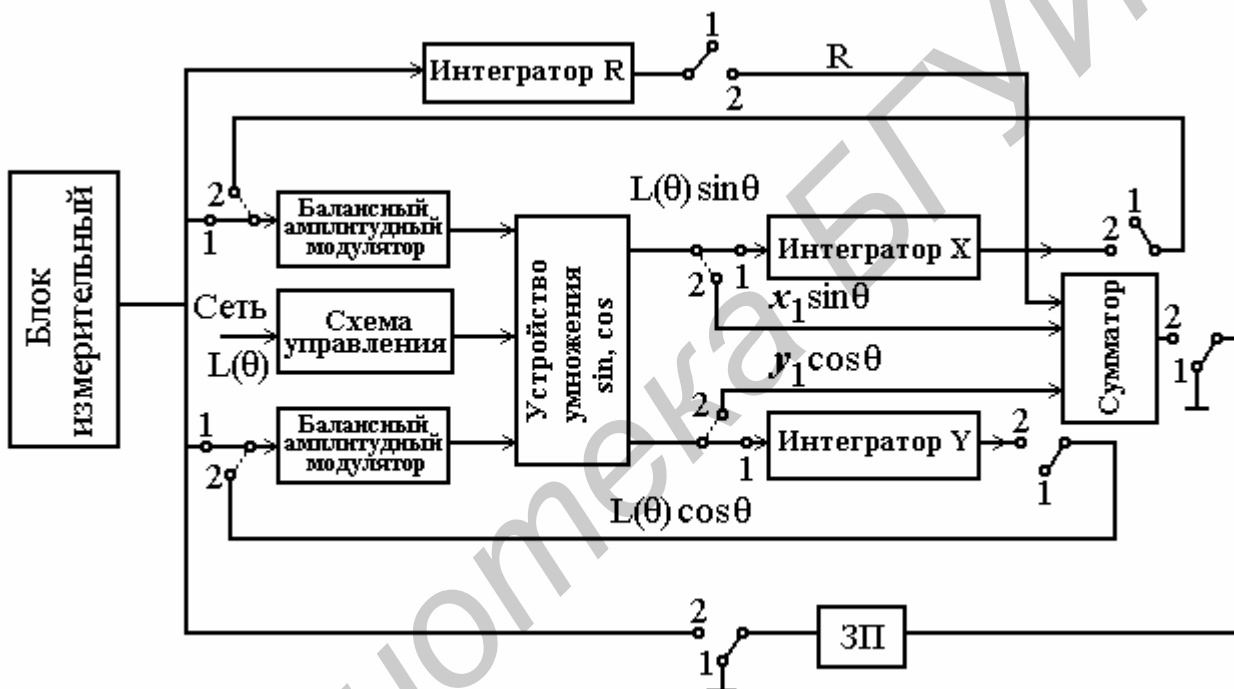


Рисунок 4.10 – Схема автоматического центрирования

Умножение производится на ключах фазового детектора: на базовые цепи ключей подается сигнал, модулированный по фазе, а на коллекторные цепи – модулированный по амплитуде. В одной цепи этот сигнал сдвинут по фазе на 90° по отношению к сигналу в другой цепи.

В результате в одном канале устройства умножения МУ получают зависимость  $L(\theta)\sin\theta$ , в другом –  $L(\theta)\cos\theta$ . Эти сигналы интегрируются интеграторами X и Y, и значения  $x_1$  и  $y_1$  запоминаются. В интеграторе R запоминается значение R. Эти операции осуществляются за первый оборот шпинделя при нахождении переключателей в положении 1. При втором обороте шпинделя переключатели устанавливаются в положение 2 и сигналы  $x_1$  и  $y_1$  с интеграторов поступают в МУ на коллекторы фазовых детекторов, а в базовые цепи поступают сигналы, запомненные при первом обороте, т.е. промодулированные по фазе. В результате в сумматор поступают сигналы  $x_1\sin\theta$ ,  $y_1\cos\theta$ , а также

R, которые после сложения компенсируют соответствующие составляющие при записи круглограммы записывающим прибором.

Структура схемы управления приведена на рисунке 4.11. За один оборот шпинделя на вход триггерной линейки поступает с формирователя (преобразователя угла поворота шпинделя) 512 импульсов. Триггерная линейка преобразует последовательность импульсов в двоичный параллельный код, которым управляются восемь ключей. Каждый из ключей коммутирует одну из восьми включенных последовательно фазосдвигающих цепей, которые определяют общий сдвиг фазы несущей частоты.

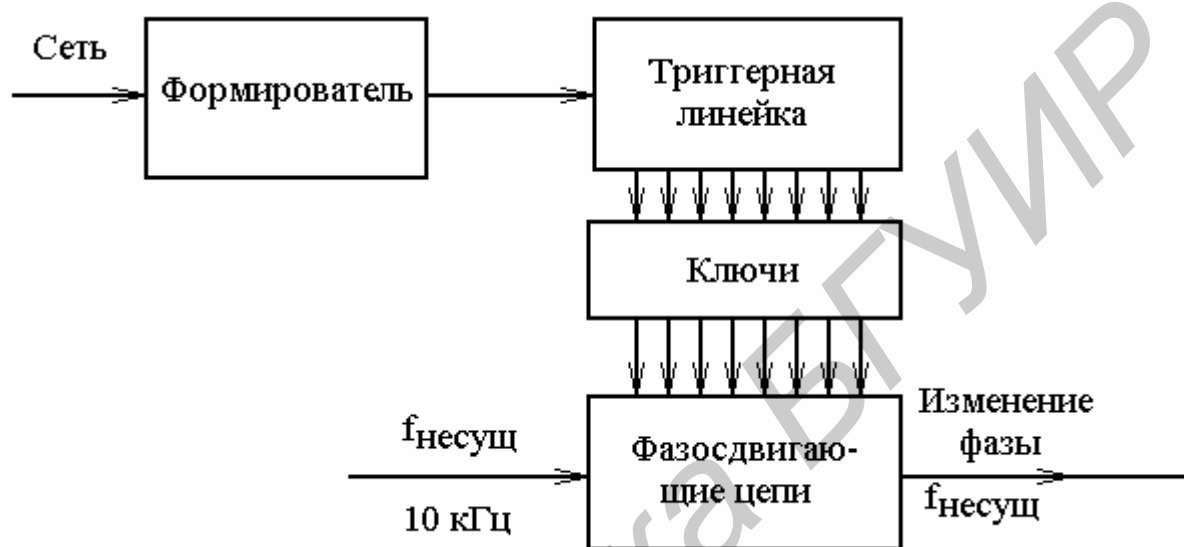


Рисунок 4.11 – Структурная схема устройства управления

Фазосдвигающие цепи обеспечивают сдвиг фазы соответственно на  $0^{\circ}42'$ ;  $1^{\circ}25'$ ;  $2^{\circ}50'$ ;  $5^{\circ}35'$ ;  $11^{\circ}15'$ ;  $22^{\circ}30'$ ;  $45^{\circ}$  и  $90^{\circ}$ . Так, при поступлении первого импульса на выходе триггерной линейки появляется код 00000001, включается первый ключ и фазосдвигающая цепь на  $0^{\circ}42'$ ; при поступлении второго импульса (код 00000010) срабатывает второй ключ и получают сдвиг фазы  $1^{\circ}25'$ ; при третьем импульсе (код 00000011) срабатывают первый и второй ключи, получают сдвиг фаз  $(0^{\circ}42' + 1^{\circ}25') = 2^{\circ}07'$  и т.д. При сдвиге фаз, равном  $179^{\circ}19'$ , напряжение изменяет свой знак на противоположный, что равносильно фазовому сдвигу  $180^{\circ}$ .

#### 4.4 Фотоэлектрические автоколлиматоры

К автоматизированным приборам следует отнести автоколлиматоры (АК) с наведением на изображение марки с помощью фотоэлектрического преобразователя (рисунок 4.12). Изображение марки сетки 2, подсвеченной лампой 1, после отражения от светоделительной плоскости куба 6 и зеркала 3, расположенного на объекте измерения, проецируется с помощью объектива 4 и куба 12 в плоскость щелевой диафрагмы 10 и на сетку окуляра 11. Диафрагма 10 приводится в колебательное (возвратно-поступательное) движение вибратором 13, питаемым переменным напряжением частотой  $f$  от источника питания (ИП). Если в поле зрения диафрагмы нет изображения марки, то в цепи фотоприемника 8, на который проецируется световой пучок линзой 9, нет измери-

тельного сигнала и на фотоприемник падает только световой поток  $\Phi_0$  фоновой засветки. Когда в поле зрения диафрагмы попадает изображение марки справа или слева от оси вибрации, то на фотоприемник поступает модулированный по амплитуде с частотой  $f$  измерительный сигнал  $U_f$ . Значение и фаза этого сигнала зависят от положения изображения марки. На рисунке 4.12 приведены кадры взаимного положения щели (заштрихована) и изображения марки. Пунктиром отмечены границы колебаний щели. Слева приведены эпюры соответствующего светового сигнала, поступающего на фотоприемник.

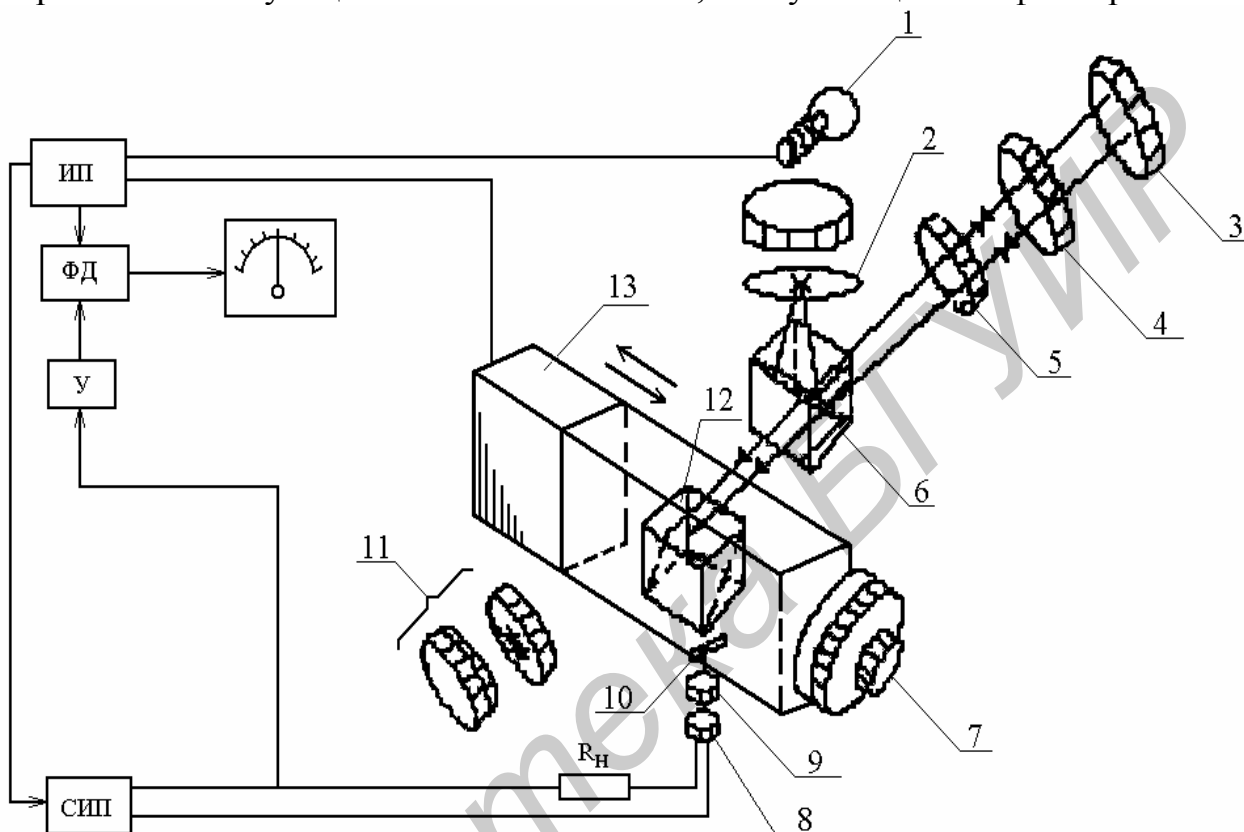


Рисунок 4.12 – Схема фотоэлектрического автоколлиматора

Измерительный сигнал частотой  $f$  с фотоприемника через усилитель (У) поступает на фазовый детектор ФД, а затем на показывающий прибор, обычно микроамперметр. Когда изображение марки совпадает с осью колебания щели, измерительный сигнал частотой  $f$  исчезает, так как при этом фотоприемник засвечивается световым потоком  $\Phi_{2f}$  двойной частоты, в результате на показывающем приборе устанавливается нулевое показание. Наведение на марку осуществляется следующим образом. Оператор, используя микровинт 7, добивается нулевого показания микроамперметра и снимает отсчет по шкале барабана микровинта. У одних моделей автоколлиматоров микровинтом смещается ось колебаний диафрагмы, у других – компенсационная линза 5.



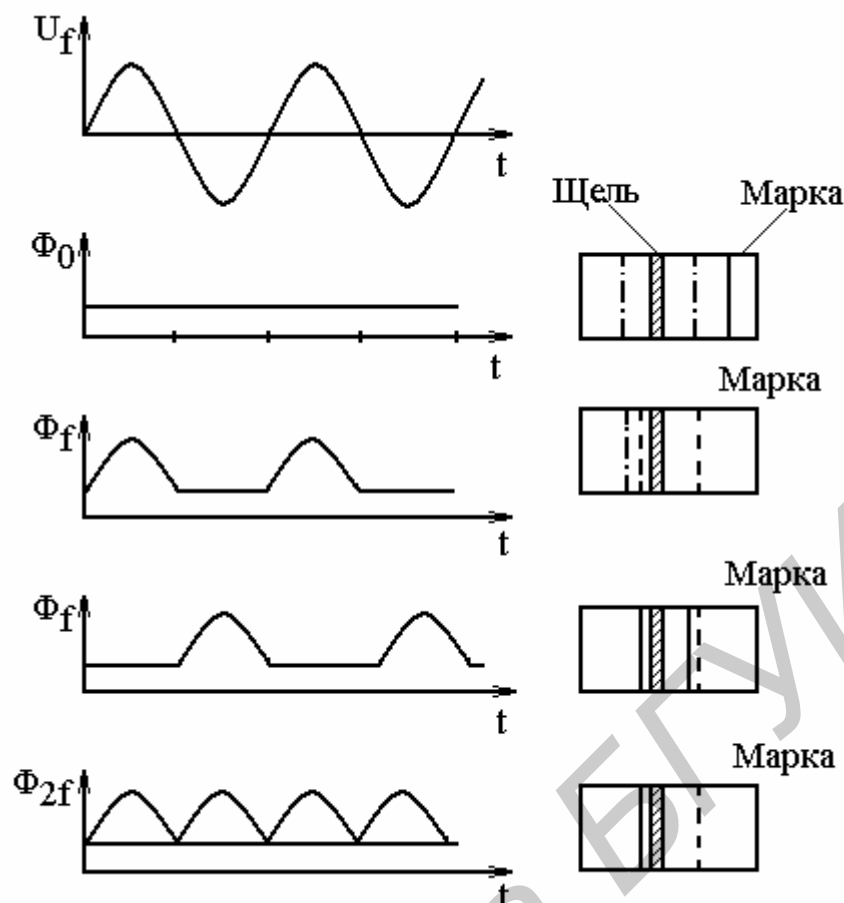


Рисунок 4.13 – Эпюры светового потока фотоэлектрического автоколлиматора

В автоколлиматоре модели АФ-1Ц автоматизированы не только фиксация наведения на марку, но и само наведение. В этом приборе компенсационная линза 5 перемещается не вручную, а посредством электродвигателя, управляемого напряжением от фазового детектора. В этом случае схема представляет собой замкнутую следящую систему. На одной оси с микровинтом установлен фотоэлектрический импульсный преобразователь, импульсы с которого поступают на цифровое индикаторное устройство. Диапазон измерения по каждой координате  $\pm 5'$ , дискретность отсчета  $0,1''$ , предел допускаемой погрешности  $2''$ .

Недостатком рассмотренных моделей приборов является наличие движущихся узлов – вибраторов, двигателей. В автоколлиматорах других типов такие узлы отсутствуют. Это достигается в результате применения фотоприемника, чувствительного к положению светового пятна.

Для исключения влияния нелинейности преобразования и дрейфа позиционно-чувствительного фотоприемника в приборе (рисунок 4.14) осуществляется самокалибровка. С этой целью в схему введен твердотельный источник света – мощный диод (МД), излучающий инфракрасные лучи ( $\lambda = 810 \text{ нм}$ ). Изображение марки 5 после отражения от зеркала попадает на фотоприемник ФП 4, который формирует измерительный сигнал. Сигнал проходит фильтр, усилитель  $У$  (уровень сигнала которого регулируется оператором и контроли-

руется по индикатору уровня сигнала), фазовый детектор (ФД), фильтр, схему автоматической регулировки усиления (АРУ) и далее попадает в модуль обработки данных (МОД), где формируются сигналы для цифровой 7 и аналоговой 6 индикации. Система выполнена по разомкнутой схеме.

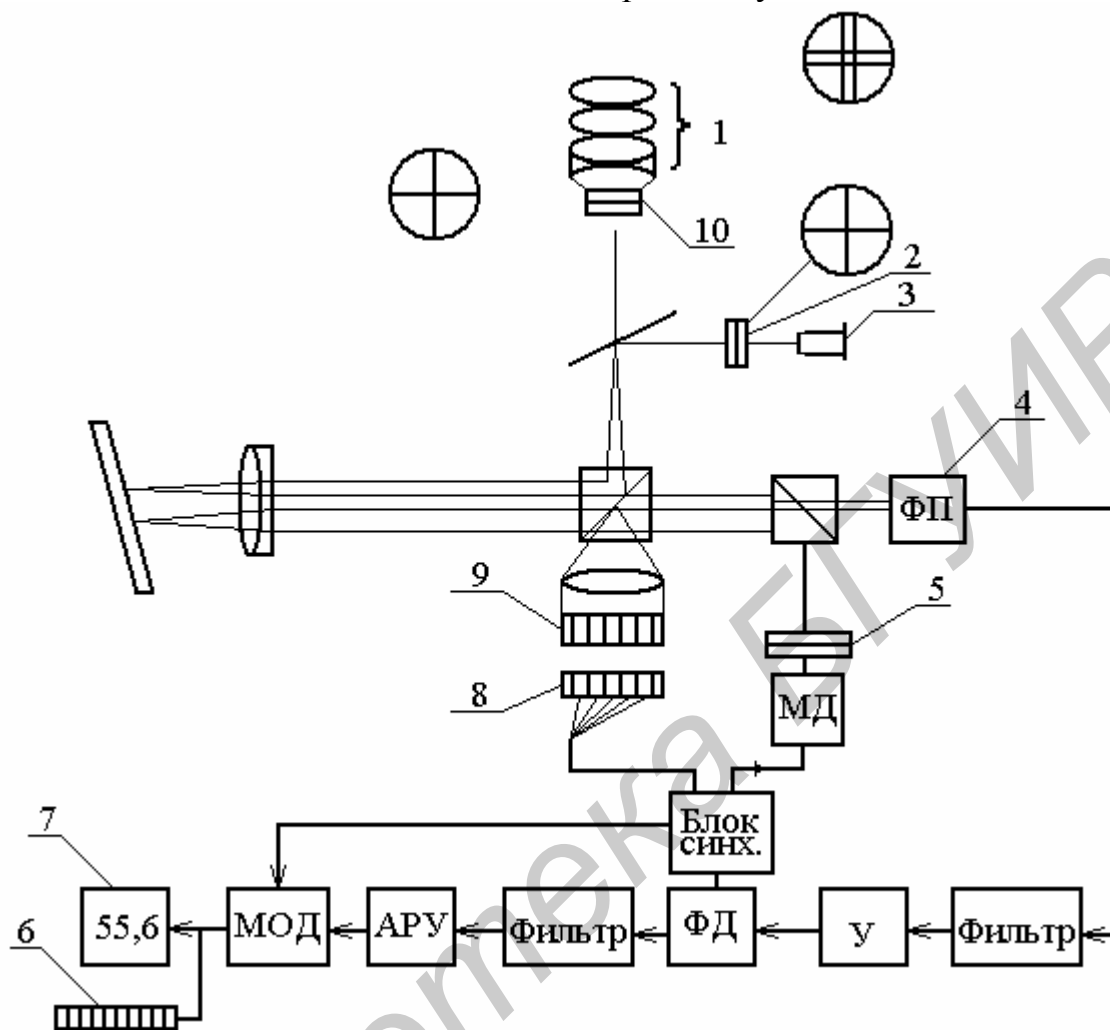


Рисунок 4.14 – Фотоэлектрический автоколлиматор

Автоматическая самокалибровка осуществляется при помощи так называемой эталонной сетки 9 и эталонной матрицы 8 из инфракрасных диодов. Эталонная сетка 9 и марка 5 поочередно проецируются на фотоприемник. Разделение во времени осуществляется посредством блока синхронизации. Окончательные показания определяются путем сопоставления измерительного и эталонного сигналов. В приборе предусмотрена регулировка нуля по обеим осям.

Визуальная индикация, используемая при наладке фотоэлектрического автоколлиматора, обеспечивается желтым светодиодом 3 и маркой 2, наблюдаемой в окуляр 1 с сеткой 10.

Такие автоколлиматоры имеют диапазоны измерений  $\pm 80$  и  $\pm 200''$ ; дискретность  $0,1''$ ; предел допускаемой погрешности  $\pm 0,8$  и  $\pm 2''$ .

## 4.5 Лазерные интерферометры

Лазерные измерители перемещений (в дальнейшем лазерные интерферометры) предназначены для прецизионных измерений линейных, угловых перемещений, контроля прямолинейности и перпендикулярности, а также скорости перемещения контролируемого объекта. В последнее время лазерные интерферометры используются для проверки координатных перемещений в металлорежущих станках и координатных измерительных машинах. Лазерный интерферометр измеряет длину методом непосредственного отсчета путем сравнения ее с длиной волны стабилизированного по частоте лазера. Сравнение измеряемой длины осуществляется двухлучевым интерферометром. Одна часть излучения направляется на подвижное зеркало, установленное на объекте, линейное перемещение которого необходимо измерять, другая – на неподвижное зеркало. Смещение зеркала (отражателя) на половину длины волны излучения, т.е. на одну интерференционную полосу, соответствует одному периоду в изменении светового потока. Число полос подсчитывается электронным счетчиком с фотоприемника, и измеряемая длина вычисляется по формуле  $L = N \cdot \lambda_{\text{возд}} / 2$ , где  $N$  – порядок интерференции, т.е. целая и дробная части числа полос;  $\lambda_{\text{возд}} = \lambda_{\text{вак}} / n_{\text{возд}}$ ,  $\lambda_{\text{вак}}$  – длина волны излучения в вакууме;  $n_{\text{возд}}$  – показатель преломления воздуха. Таким образом, измерение длины обязательно должно сопровождаться прохождением отражателем контролируемого расстояния.

По способу обработки информационного сигнала лазерные интерферометры делятся на амплитудные и фазовые. В амплитудных и фазовых системах сигнал измерительной информации снимается с фотоприемника, установленного в поле интерференции двух световых волн: информационной, оптическая длина пути которой определяется контролируемым перемещением, и опорной с постоянной оптической длиной пути. При этом оптическая разность хода двух интерферирующих волн пропорциональна контролируемому перемещению. Оптические частоты интерферирующих световых волн в амплитудных системах равны между собой, а в фазовых отличаются друг от друга.

В амплитудных системах частота  $f$  переменной составляющей сигнала измерительной информации определяется скоростью перемещения контролируемого объекта и изменяется от 0 до 1 МГц в диапазоне скоростей от 0 до 20 м/мин. С такой зависимостью частоты от скорости перемещения необходимо после фотоприемника применять широкополосные усилители, что приводит к снижению помехоустойчивости системы. Следует также отметить сильную зависимость чувствительности системы от скорости перемещения объекта измерения. Минимальная дискретность отсчета 0,08 мкм.

Фазовые системы лишены тех недостатков, которые имеют амплитудные интерферометры. В них перемещение объекта измерения преобразуется в фазовый сдвиг выходного синусоидального сигнала, несущая частота которого равна разности частот интерферирующих световых волн. На рисунке 4.15 представлена схема одночастотного лазерного интерферометра. Принцип действия его основан на волновом способе преобразования, при котором фазовый сдвиг световых волн преобразуется в фазовый сдвиг электрического сигнала задан-

ной несущей частоты  $f = 8$  МГц.

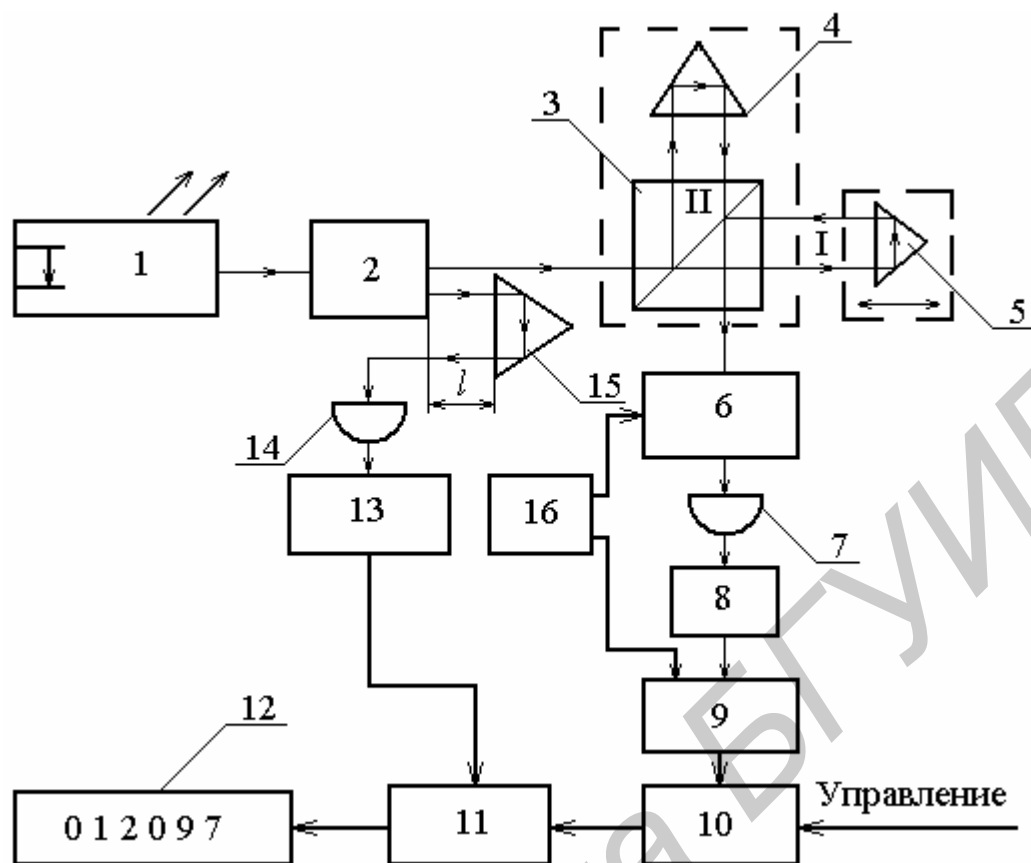


Рисунок 4.15 – Одночастотный лазерный интерферометр

Этот способ обуславливает простоту оптической схемы (одночастотный лазер и неполяризационная оптика) и большой диапазон разности частот интерферирующих световых волн – от единиц до сотен мегагерц (т.е. скорость контролируемых перемещений до 100 м/мин). Световой поток лазера 1 через коллиматор 2 направляется на светоделительный кубик 3, где разделяется на информационный I и опорный II световые потоки. Поток I проходит на подвижный отражатель 5 и возвращается на акустооптический модулятор 6, куда попадает и поток II после прохождения им опорного расстояния до отражателя 4. Генератором 16 возбуждается в модуляторе бегущая ультразвуковая волна на частоте 8 МГц. После модулятора в результате наложения потоков I и II на фотоприемнике выделяется сигнал с разностной частотой 8 МГц, фаза которого пропорциональна контролируемому перемещению. Причем изменению фазы на один период соответствует перемещение отражателя 5 на 0,316 мкм. Измерительный сигнал с фотоприемника 7 через усилитель 8 поступает на фазометр 9. Туда же поступает опорный сигнал с генератора 16. В результате сравнения измерительного и опорного сигналов в реверсивном счетчике 10 подсчитывается число фазовых циклов, и после умножения в блоке 11 на масштабный коэффициент результат выводится на цифровой дисплей 12.

Значение масштабного коэффициента корректируется (из-за изменения внешних условий) по результатам измерения нормированного расстояния  $l$  в базовом канале до отражателя 15. В зависимости от полученного числа фазо-

вых циклов (т.е. интерференционных полос) на фотоприемнике 14 по сравнению с номинальным числом при нормальных условиях измерений изменяется значение масштабного коэффициента в блоке 13, и это значение подается на блок умножения 11. Изменение характеристик фотоприемников, колебание уровня мощности излучения и т.п. уменьшают надежность и стабильность одночастотных лазерных интерферометров.

Двухчастотные лазерные интерферометры в отличие от одночастотных практически безынерционны, не требуют усиления сигнала после фотоприемника и позволяют расширить измеряемый диапазон длин до 100 м. Схема двухчастотного лазерного интерферометра модели «Размер-2К» приведена на рисунке 4.16.

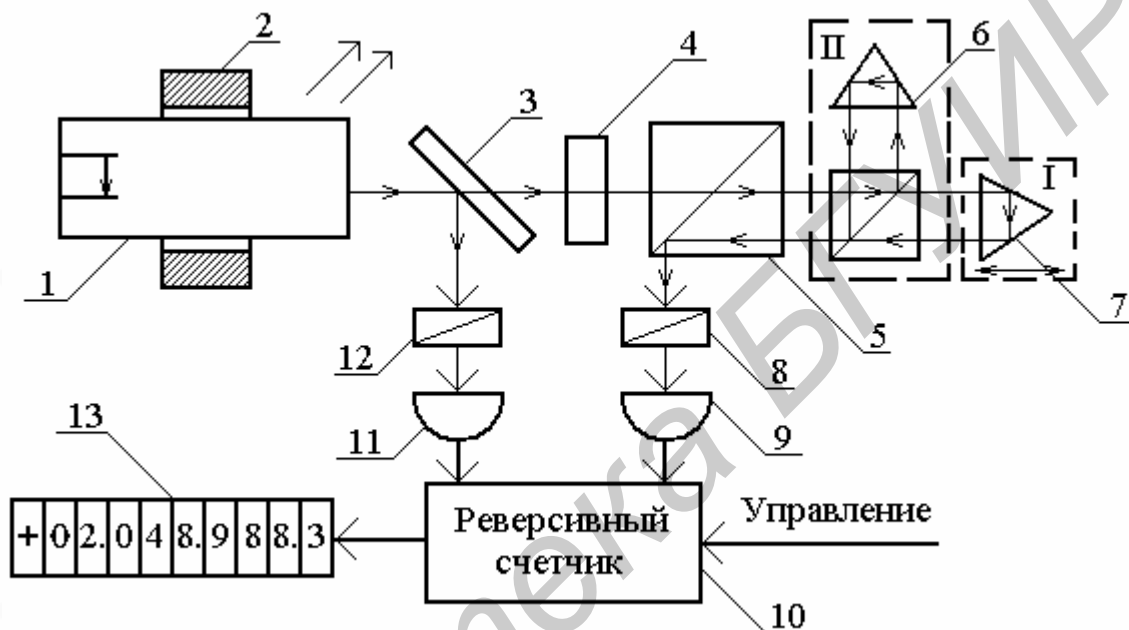


Рисунок 4.16 – Двухчастотный лазерный интерферометр

Источником излучения служит гелий-неоновый лазер 1 с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. Цилиндрический постоянный магнит 2, охватывающий полость лазера, возбуждает в нем две пространственно совмещенные составляющие излучения с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , имеющими круговую поляризацию в противоположных направлениях и разнесенными на частоты  $f_p = 2$  МГц. Когерентное излучение лазера характеризуется фазой, частотой и поляризацией. Здесь используется эффект Зеемана, при котором одночастотный лазер излучает две разнесенные частоты с двумя различными направлениями круговой поляризации (правой и левой).

Полупрозрачная пластина 3 делит излучение на две части. Одна составляющая излучения с частотами  $f_1$  и  $f_2$  проходит поляризационный фильтр 12, и на фотоприемнике 11 возникает «бегущая» интерференционная картина. Сигнал разностной частоты  $f_p$  с фотоприемника 11 подается на вход реверсивного счетчика 10.

Другая составляющая излучения проходит пластину 3, поляризуется по вертикали и горизонтали пластиной 4 и направляется на светоделительный куб 5, где разделяется на информационный I и опорный II потоки. Отразившись

от отражателей 6 и 7, потоки I и II соединяются и интерферируют, проходят поляризационный фильтр 8, фотоприемник 9 и направляются на реверсивный счетчик 10, который после умножения выдает сигнал о значении измеряемой величины на цифровой индикатор 13. В случае измерения скорости перемещения на отражателе 7 в сигнале фотоприемника 9 возникает доплеровский сдвиг частоты (от 10 кГц до 2 МГц), зависящий от скорости перемещения. Этот сигнал сравнивается с опорным сигналом фотоприемника 11, фиксируется в счетчике 10, вычисляется и подается на десятиразрядный цифровой индикатор.

### Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные направления автоматизации универсальных средств линейно-угловых измерений.
- 2 Из каких основных частей состоит КИМ и каково их назначение?
- 3 Принцип работы КИМ. Какие типы преобразователей используются в КИМ?
- 4 Назовите основные операции поверки КИМ.
- 5 Принцип работы электронного уровня с емкостным преобразователем.
- 6 Принцип работы электронного уровня с индуктивным преобразователем.
- 7 Приведите схему поверки уровня лазерным интерферометром.
- 8 Кругломеры, принцип действия и устройство. Какие типы измерительных преобразователей используются в кругломерах?
- 9 Назовите автоматизированные операции в кругломере, выполняемые программным путем.
- 10 Принцип работы автоматизированного профилографа-профилометра.
- 11 Назначение и принцип работы фотоэлектрического автоколлиматора.
- 12 Как производится автоматическое наведение на изображение марки в фотоэлектрическом автоколлиматоре?
- 13 Как производится самокалибровка фотоэлектрического автоколлиматора?
- 14 В чем заключаются особенности работы одночастотного лазерного интерферометра в режиме измерения длины, угла и прямолинейности?
- 15 Сравните одночастотный и двухчастотный лазерные интерферометры. Укажите основные достоинства двухчастотного интерферометра в сравнении с одночастотным.
- 16 Основным преобразователем, преобразующим световой поток в электрический сигнал, является фотоприемник. Опишите его устройство и принцип действия.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие. Ч. 1. – Мн.: БГУИР, 2002. – 69 с.: ил.
- 2 Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие. Ч. 2. – Мн.: БГУИР, 2003. – 103 с.: ил.
- 3 Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн.: Пер. с фр. – М.: Мир, 1992. – 480 с.: ил.
- 4 Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Н. Евтихиева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
- 5 Касаткин А.С., Перекалин М.А., Сергеев П.С. Электротехника. – М.: Гос. энерг. изд-во, 1953. – 430 с.: ил.
- 6 Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.: ил.
- 7 Малышев В.М., Механиков А.И. Гибкие измерительные системы в метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 176 с.: ил.
- 8 Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.: ил.
- 9 Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Халкин, Е.В. Федорова и др.; Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.: ил.
- 10 Основы автоматизации измерений: Учеб. пособие / В.Б. Коркин, Т.В. Григорьянц, Э.Ф. Макаров и др. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 256 с. ил.
- 11 Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. Е.М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 480 с.: ил.
- 12 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2001. – 408 с.: ил.
- 13 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 259 с.: ил.
- 14 Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.: ил.
- 15 Электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душина. – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1980. – 392 с.: ил.

Св. план 2005, поз. 108

Ревин Валерий Тихонович

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Учебное пособие  
для студентов специальности *I-54 01 01*  
*«Метрология, стандартизация и сертификация»*

всех форм обучения

В 5-ти частях

Часть 5

Редактор Т.А. Лейко  
Корректор Н.В. Гриневич

---

Подписано в печать 07.06.2005.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 5,6.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 5,7.  
Заказ 23.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.  
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6