

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«УТВЕРЖДАЮ»:
Декан ЭФФ
_____ Г.С.Евтушенко

«_____» _____ 2008г

АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Учебное пособие по курсовому проектированию
аналоговых приборов для студентов
-бакалавров направления «200100-Приборостроение»
специальности «Информационно-измерительная
техника и технологии»

Томск 2008

УДК 621.317.083.92

Аналоговые измерительные устройства

Учебное пособие по курсовому проектированию для студентов специальности «Информационно-измерительная техника и технологии»

/ Сост. Д. В. Миляев – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 92с.

Рецензент: доцент, к.т.н. Б.Б. Винокуров

Учебное пособие по курсовому проектированию рекомендовано к изданию методическим семинаром кафедры информационно-измерительной техники (ИИТ) «__17 __» мая __2008года.

Зав кафедрой ИИТ, профессор, д.т.н. А.Е. Гольдштейн

1. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

I. Введение

Разработка аналоговых преобразователей и приборов является целью курсового проектирования по курсу «Аналоговые измерительные устройства». В соответствии с требованиями ТПУ эти требования сводятся к следующим: КП и КР является самостоятельной работой студента, выполняемой в процессе обучения для решения следующих задач:

- 1) закрепление и более глубокое усвоение теоретических знаний и практических навыков в применении методов для решения конкретных задач;
- 2) приобретение навыков и освоение методов анализа и синтеза, выбора и обоснования при проектировании заданных объектов;
- 3) развитие самостоятельности при выборе методов достижения цели и творческой инициативы при решении конкретных задач;
- 4) подготовка к выполнению ВКР.

II. Основные составляющие курсовой работы

К ним относятся:

- тематический реферат (ТР) курсовой работы;
- текстовый документ (ТД) - научно-технический документ, содержащий систематизированные данные о выполненной студентом проектной, научной или исследовательской работе, описывающий процесс ее выполнения и полученные результаты в виде текста и необходимых иллюстраций;
- техническое задание (ТЗ) - документ, определяющий исходные требования, предъявляемые к объекту разработки, а также объем, форму и сроки представления результатов работы по технической специальности, направлению или дисциплине.

III. Структура курсовой работы

Работа в общем случае должна содержать:

- текстовый документ (ТД);
- графический материал.

Примечания

1 Необходимость представления графического материала определяется заданием и условиями защиты работы.

2 Работа может быть полностью или частично представлена на технических носителях данных ЭВМ (ГОСТ 28388-89), если это установлено заданием (ТЗ).

ТД должен включать в указанной ниже последовательности:

- титульный лист;
- задание (ТЗ);
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

IV. Требования к структурным элементам текстового документа (ТД)

Общие требования

1. ТД должен в краткой и четкой форме раскрывать творческий замысел работы, постановку задачи, выбор и обоснование принципиальных решений, содержать описание методов исследования анализа, расчетов, описание проведенных экспериментов, анализ результатов экспериментов и выводы по ним.

Текст должен сопровождаться иллюстрациями (графиками, эскизами, диаграммами, схемами и т.п.).

2. Оформление ТД должно быть произведено:

- для КП и ВКР инженера по ГОСТ 2.105;
- для КР, ТР, ВКР бакалавра и диссертации магистра по ГОСТ 7.32;

- для проекта АСУ по ГОСТ 24.301;
 - для проекта программной документации по ГОСТ 19.106 и ГОСТ 19.404.
3. ТД должен быть выполнен на русском языке.

Допускается выполнение ТД на иностранном языке, если это установлено заданием (ТЗ).

Титульный лист

Форма титульных листов и образцы их заполнения приведены в приложениях А.

Задание (техническое задание)

1. Проект, работа, диссертация должны выполняться на основе индивидуального задания, содержащего требуемые для решения поставленных задач исходные данные, обеспечивающие возможность реализации накопленных знаний в соответствии с уровнем профессиональной подготовки каждого студента.

2. Руководитель работы в соответствии с темой составляет ЗАДАНИЕ (техническое задание – ТЗ) по форме, приведенной в приложении Г.

Примечание - Формулировка темы для ВКР в задании должна точно соответствовать ее формулировке в приказе по университету.

3. В разделе 3 ТЗ (Приложение Г) для технических дисциплин следует указать основные технические требования, предъявляемые к изделию, процессу и т.п..

4. Форма задания заполняется рукописным или машинописным способом.

Реферат

1. Реферат (ГОСТ 7.9, ГОСТ 7.32) размещается на отдельном листе (странице). Объем реферата не должен превышать 0,5 – 1 страницы.

По рекомендации кафедры реферат, либо заключение (пункт 5.8) должен быть переведен на иностранный язык.

Заголовком служит слово "Реферат" (для реферата на иностранном языке - соответствующий иностранный термин), написанное прописными буквами симметрично тексту.

2. Реферат должен содержать:

- сведения о количестве листов (страниц) ТД, количестве иллюстраций, таблиц, использованных источников, приложений, листов графического материала;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата.

Перечень ключевых слов должен включать от 6 до 15 слов или словосочетаний из текста ТД, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются прописными в строку через запятые.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод исследования и аппаратуру;
- полученные результаты и их новизну;
 - основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики;
- степень внедрения;
- рекомендации или итоги внедрения результатов работы;
- область применения;
- экономическую эффективность или значимость работы;
- прогнозные предположения о развитии объекта исследования (разработки)
- дополнительные сведения (особенности выполнения и оформления работы и т.п.).

Если ТД не содержит сведений по какой-либо из перечисленных структурных частей реферата, то в тексте реферата она опускается, при этом последовательность изложения сохраняется.

Изложение материала в реферате должно быть кратким и точным. Следует избегать сложных грамматических оборотов.

Содержание

1. Содержание должно отражать все материалы, представляемые к защите работы.

2. Слово "Содержание" записывают в виде заголовка, симметрично тексту, прописными буквами.

3. В содержании перечисляют заголовки разделов, подразделов, список использованных источников, каждое приложение ТД и указывают номера листов (страниц), на которых они начинаются.

При наличии самостоятельных конструкторских, технологических, программных и иных документов, помещаемых в ТД, их перечисляют в содержании с указанием обозначений и наименований.

Материалы, представляемые на технических носителях данных ЭВМ, должны быть перечислены в содержании с указанием вида носителя, обозначения и наименования документов, имен и форматов соответствующих файлов, а также места расположения носителя в ТД.

В конце содержания перечисляют графический материал, представляемый к публичной защите, с указанием: "На отдельных листах".

Введение

1. В разделе "Введение" указывают цель работы, область применения разрабатываемой проблемы, ее научное, техническое и практическое значение, экономическую целесообразность для народного хозяйства.

2. Во введении следует:

- раскрыть актуальность вопросов темы;
- охарактеризовать проблему, к которой относится тема, изложить историю вопроса, дать оценку современного состояния теории и практики, привести характеристику отрасли (подотрасли) промышленности, предприятия - базы дипломной практики;
- изложить задачи в области разработки проблемы, т. е. сформулировать задачи темы работы;
- перечислить методы и средства, с помощью которых будут решаться поставленные задачи;

- кратко изложить ожидаемые результаты, в том числе технико - экономическую целесообразность выполнения данной темы, либо экономическую эффективность.

Рекомендуемый объем введения устанавливается преподавателем.

Основная часть

1 Содержание основной части работы должно отвечать заданию (ТЗ) и требованиям, изложенным в методических указаниях соответствующей кафедры.

2 Наименования основных разделов пояснительной записки отражают выполнение задания. Содержание и объем совместно разрабатывают студент и руководитель, исходя из требований методических указаний профилирующей кафедры и ГОСТ 7.32.

3 Разделы по жизнеобеспечению должны быть разработаны в соответствии с действующими государственными стандартами и инструкциями по технике безопасности промышленных предприятий и организаций.

4 Рассмотрение вопросов по охране природы включается в работу в случае, если эксплуатация разрабатываемого объекта связана с загрязнением окружающей среды. Здесь же следует предусмотреть мероприятия по защите окружающей среды, используя отечественную и зарубежную информацию в этой области, действующие государственные стандарты по охране природы и опыт промышленных предприятий.

5 Экономическая часть проекта должна содержать расчеты наиболее важных технико-экономических показателей.

Экономическая эффективность должна определяться на основе сравнения вариантов и серии последовательно выполняемых расчетов, степень детализации которых зависит от темы проекта.

Все расчеты должны производиться по действующим методикам, перечень которых в каждом конкретном случае определяется консультантом по данному разделу.

Заключение

1 Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы, ее экономическую, научную, социальную значимость.

2 Заголовок "Заключение" размещают посередине странице и выполняют прописными буквами.

Список использованных источников

1 Заголовок "Список использованных источников" записывают симметрично тексту прописными буквами.

2 В список включают все источники, на которые имеются ссылки в ТД. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте ТД арабскими цифрами без точки.

3. Сведения об источниках приводят в соответствии с требованиями ГОСТ.

Приложения

1. В приложения рекомендуется включать материалы иллюстрационного и вспомогательного характера. В приложения могут быть помещены:

- таблицы и рисунки большого формата;
- дополнительные расчеты;
- описания применяемого в работе нестандартного оборудования;
- распечатки с ЭВМ;
- протоколы испытаний;
- акты внедрения;
- отчеты о патентных исследованиях;
- самостоятельные материалы и документы конструкторского, технологического и прикладного характера.

2. На все приложения в тексте ТД должны быть даны ссылки.

3. Приложения располагают в ТД и обозначают в порядке ссылок на них в тексте.

4. Приложения оформляются как продолжение пояснительной записки на последующих ее страницах по правилам и формам, установленным

действующими стандартами. Приложения, содержащие дополнительные текстовые конструкторские документы (спецификации, руководство по эксплуатации и др.) следует помещать в приложение в последнюю очередь.

5. Приложения могут быть обязательными и информационными. Информационные приложения могут быть рекомендуемого и справочного характера.

6. Каждое приложение должно начинаться с нового листа и иметь тематический заголовок и обозначение. Наверху посередине листа (страницы) печатают (пишут) прописными буквами слово "Приложение" и его буквенное обозначение (заглавные буквы русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, Й, О, Ч, Ъ, Ы, Ь), а под ним в скобках указывают степень необходимости приложения, например: "(рекомендуемое)", "(справочное)", "(обязательное)".

7. При наличии только одного приложения, оно обозначается "ПРИЛОЖЕНИЕ А".

8. Рисунки, таблицы, формулы, помещаемые в приложении, нумеруют арабскими цифрами в пределах каждого приложения, например:

"...рисунок Н.5...".

V. Требования к оформлению ТД

Общие требования

ТД должен быть выполнен на белой бумаге формата А4 (210x297 мм) желательно с одной стороны листа одним из следующих способов:

- рукописным - четким, разборчивым почерком, с высотой букв и цифр не менее 2,5 мм. Текст должен быть написан тушью, чернилами или пастой синего или черного цвета.

Расстояние между основаниями строк 8-10 мм;

- машинописным - через 1,5-2 интервала. Шрифт машинки должен быть четким, лента только черного цвета. Формулы должны быть вписаны от руки черной пастой или тушью;

- с применением печатающих или графических устройств вывода ЭВМ -

через 1,5-2 интервала, высота букв и цифр не менее 1,8 мм (Times New Roman 12), цвет – черный.

Иллюстрации, таблицы и распечатки с ЭВМ допускается выполнять на листах формата А3, при этом они должны быть сложены на формат А4 "гармоникой" по ГОСТ 2.501.

Текст ТД следует выполнять, соблюдая размеры полей: левое - не менее 30 мм, правое - не менее 10 мм, верхнее - не менее 15 мм, нижнее - не менее 20 мм.

Абзацы в тексте начинают отступом, равным пяти ударам клавиатуры ЭВМ или пишущей машинки (15-17 мм).

Допускается выполнение ТД по формам 9 и 9а ГОСТ 2.106 с основными надписями по формам 2 и 2а ГОСТ 2.104.

Опечатки, описки, графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения ТД, допускается исправлять аккуратным заклеиванием или закрашивание белой краской и нанесением на том же месте и тем же способом исправленного текста. Повреждение листов ТД, помарки и следы не полностью удаленного текста не допускаются.

ТД должен быть сшит (переплетен) и иметь обложку. В ТР, КР, КП обложку рекомендуется выполнять на плотной бумаге, совмещая ее с титульным листом.

Если ТД полностью выполнен на технических носителях данных ЭВМ, в обложку (папку) должны быть помещены:

- титульный лист;
- реферат на русском языке, выполненный согласно требованиям. Дополнительно должны быть даны указания о виде носителя, его размещении в обложке (папке), а также информация, необходимая и достаточная для просмотра всех материалов работы на экране ЭВМ;
- задание (ТЗ), утвержденное заведующим кафедрой;
- технический носитель данных. Размещение носителя должно исключать его случайное выпадение из папки (обложки).

Титульный лист, реферат и задание (ТЗ) должны быть выполнены на бумаге согласно требованиям.

VI. Требования к тексту ТД

1. В ТД должны применяться термины, обозначения и определения, установленные стандартами по соответствующему направлению науки, техники и технологии, а при их отсутствии - общепринятые в научно-технической литературе.

2. В ТД не допускается:

- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- применять произвольные словообразования;
- применять индексы стандартов (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ и т.п.), технических условий (ТУ) и других документов без регистрационного номера.
- использовать в тексте математические знаки и знак \emptyset (диаметр), а также знаки N (номер) и % (процент) без числовых значений. Следует писать: "температура минус 20 °С"; "значение параметра больше или равно 35" (но не "температура -20 °С" или "значение параметра ≥ 36 "); "стержень диаметром 25 мм" (а не "стержень $\emptyset 25$ "); "изделие N 325", "номер опыта" (но не " N опыта"); "влажность 98 %", "процент выхода" (но не " % выхода").

Оформление чертежей деталей и сборочных чертежей

1. Оформление чертежей деталей и сборочных чертежей должно соответствовать требованиям стандартов ЕСКД.

2. На чертеже детали должны быть указаны:

- все размеры, необходимые для изготовления данной детали с указанием предельных отклонений размеров. Предельные отклонения размеров должны соответствовать требованиям стандартов Единой системы допусков и посадок (ЕСДП);
- шероховатость поверхностей детали, выполняемых по данному чертежу,

независимо от метода их образования;

- технические требования, которые должны располагаться над основной надписью чертежа;

- условные обозначения марки материала в соответствии со стандартами или техническими условиями на данный материал.

3. На сборочных чертежах должны быть указаны:

- габаритные и присоединительные размеры сборочной единицы (прибора, блока, узла и т.п.);

- технические требования, предъявляемые к сборке изделия;

- номера позиций, указанные в спецификации сборочной единицы. Номера позиций наносят на полках линий-выносок, проводимых от изображений составных частей. Номера позиций указывают на тех изображениях, на которых соответствующие составные части проецируются как видимые, как правило, на основных видах и заменяющих их разрезах.

Номера позиций располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют в колонку или строчку по возможности на одной линии. Размер шрифта номеров позиций должен быть на один - два номера больше, чем размер шрифта, принятого для размерных чисел на том же чертеже.

При выполнении чертежей деталей и сборочных чертежей необходимо пользоваться нормативно-технической документацией, приведенной в приложении К.

Спецификация изделия

1. Спецификация определяет состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и необходима для его изготовления, комплектования конструкторских документов и планирования запуска в производство указанных изделий. Спецификацию составляют на отдельных листах формата А4 по формам 1, 1а приложения А, приведенного в ГОСТ 2.106.

Допускается помещать спецификацию на поле сборочного чертежа. При этом ее заполняют в том же порядке и по той же форме, что и спецификацию, выполненную на отдельных листах.

В спецификацию вносят составные части, входящие в специфицируемое изделие, а также конструкторские документы, относящиеся к этому изделию и его неспецифицируемым составным частям.

2. Спецификация в общем случае должна состоять из следующих разделов:

- документация;
- комплексы;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наличие тех или иных разделов определяется составом самого изделия.

Наименование каждого раздела указывают в виде заголовка в графе "Наименование" и подчеркивают.

Заполнение разделов спецификации - по ГОСТ 2.108.

2. СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект должен содержать пояснительную записку и чертежи проекта. **Пояснительная записка включает:**

1. Обзор методов измерения электрической величины по теме проекта.
2. Выбор методов измерения и структурной схемы прибора.
3. Градуировка прибора в соответствии с выбранным представлением результата на шкале прибора. Определение общего (результатирующего коэффициента преобразования прибора).

4. Распределение общего коэффициента преобразования по отдельным преобразователям структурной схемы с целью выбора их принципиальных схем.
5. Выбор элементов принципиальной схемы и её расчет.
6. Составление уравнения преобразования по принципиальной схеме, градуировка (проверка расчета) прибора.
7. Анализ и расчет погрешностей прибора, установление класса точности.
8. Спецификация элементов схемы.
9. Литература.

Графическая часть проекта включает:

1. Лист формата 3 – структурная схема.
2. Лист формата 3 – принципиальная схема.
3. Лист формата 3 – общий вид (3 проекции).
4. Лист формата 3 – детализовка (две детали).

3.ПРОЕКТИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА.

Введение:

Измерение напряжения и силы тока – наиболее распространённый вид измерений. В различных областях науки и техники эти измерения осуществляются в широком диапазоне частот – от постоянного тока и инфранизких частот (сотые доли герца) до сверхвысоких частот (1 ГГц и более) и в большом диапазоне измеряемых значений напряжения тока – соответственно от нановольт до сотен киловольт и от 10 до десятков и сотен ампер (при большом многообразии форм измеряемого напряжения и тока). Измерение постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значений и полярности.

Выбор метода и средств измерения напряжения и силы тока обуславливается требуемой точностью измерений, амплитудным и частотным диапазоном измеряемого сигнала, мощностью, потребляемой прибором от измерительной цепи.

В зависимости от способа получения результата методы измерений делятся на прямые, при которых значение напряжения (тока) измеряется непосредственно, и косвенные, результат которых находится по результатам прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной той или иной функциональной зависимостью.

Для измерения напряжения (тока) применяются следующие основные методы измерений: непосредственной оценки, при котором числовое значение измеряемой величины определяется по отчётному устройству, отградуированному в единицах этой величины и сравнения, при котором значение измеряемой величины определяется на основе сравнения воздействия измеряемой величины на какую – либо систему с воздействием на эту же систему образцов меры. В приборах для измерения напряжения и силы тока применяются три разновидности метода сравнения: нулевой, дифференциальный, замещения.

Методы непосредственной оценки.

Сущность методов заключается в том, что о значении измеряемой величины судят по показанию одного или нескольких приборов заранее проградуированных в единицах измеряемой величины или единицах других величин, от которых зависит измеряемая величина.

1. Метод преобразования тока в угол отклонения.

Суть метода заключается в преобразовании тока в угол отклонения подвижной части измерительного механизма (ИМ).



Для преобразования тока в угол отклонения применяются магнитоэлектрические, электродинамические и электромагнитные измерительные механизмы.

а) магнитоэлектрические измерительные механизмы:

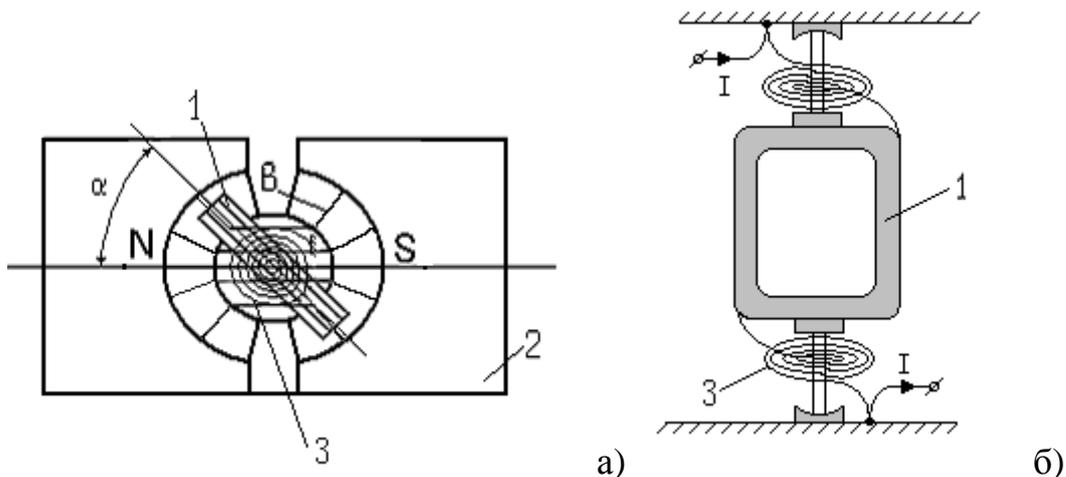


Рис 1.

1- рамка с током;

2- магнит;

3- упругий элемент (пружина), создающий противодействующий момент.

В магнитоэлектрических измерительных механизмах вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током, выполняемого обычно в виде катушки- рамки.

Уравнение преобразования для магнитоэлектрического преобразователя.

$$M_{вр} = Bs\omega I, M_{пр} = W\alpha, \sum W = 0 \Rightarrow$$

$$\alpha_{мэ} = Bs\omega I / W = S_I, S_I = Bs\omega I / W$$

где: S_I - чувствительность измерительного механизма.

$M_{вр}$ – вращательный момент; $M_{пр}$ - противодействующий момент, α - угол отклонения;

I - ток в обмотке;

B - линии магнитной индукции; W - удельный противодействующий момент;

ω - ЧИСЛО ВИТКОВ.

Характеристики - класс точности 0,05, предел измерения 10 мкА – 10 мА.

Достоинства магнитоэлектрических ИМ – высокая точность, большая чувствительность.

Недостатки – сложная и дорогая конструкция, измерения только на постоянном токе.

б) электродинамические измерительные механизмы:

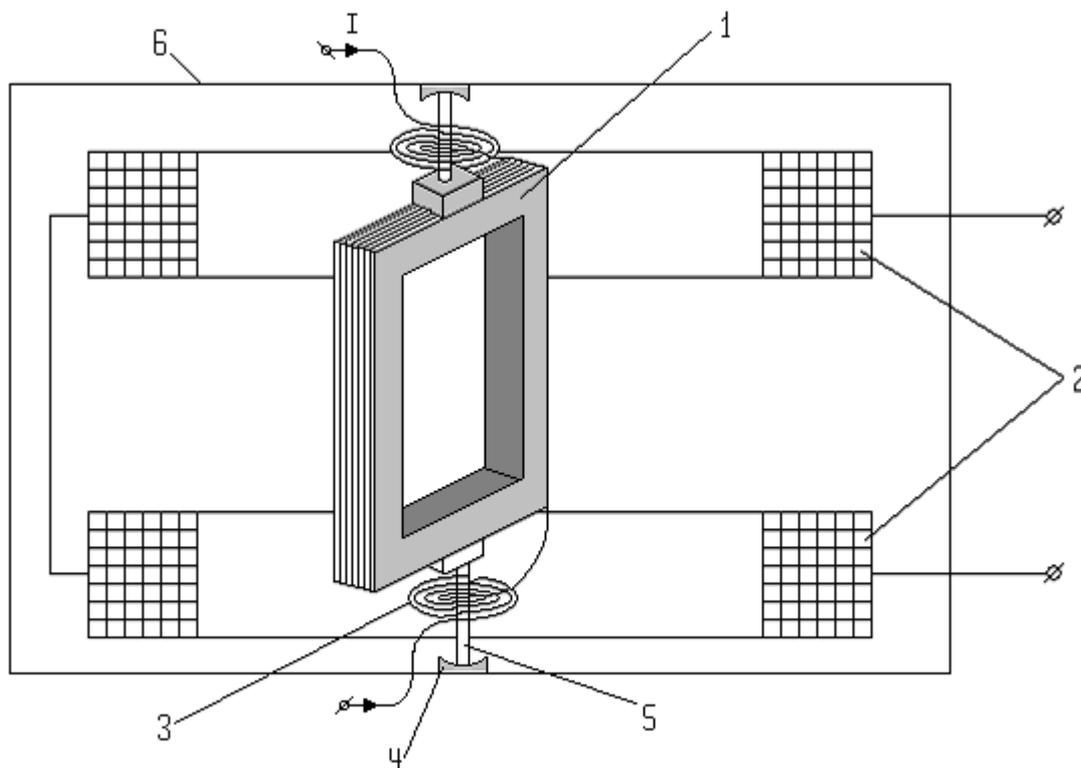


Рис 2.

1 – подвижная катушка;

2 – неподвижные катушки (соединены последовательно);

3 – упругий элемент (пружина), создающий противодействующий момент;

4 – подпятник;

5 – подвижная опора;

6 – корпус.

В электродинамических измерительных механизмах вращающий момент возникает в результате воздействия магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами.

Уравнение преобразования для электродинамического преобразователя.

$$M_{вр} = I^2/2 * dM_{12}/d\alpha, \quad M_{пр} = W\alpha, \quad \alpha_{\omega} = \frac{1}{\omega} I^2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha}, \text{ где:}$$

α - угол отклонения; I - ток в обмотке; ω - число витков;

M - взаимная индуктивность между подвижной и неподвижной катушками.

Характеристики - класс точности 0,1; 0,2; 0,5. Значение предела измерения зависит от параметров катушки (толщина проволоки, число витков и т.д.), предел измерения 1 мА – 100 мА.

Достоинства электродинамических ИМ – высокая точность и возможность использования их в цепях постоянного и переменного токов.

Недостатки – малая чувствительность, влияние внешних магнитных полей на показание ИМ, большая мощность потребления, ограниченный частотный диапазон (до 1,5 КГц).

в) электромагнитные измерительные механизмы:

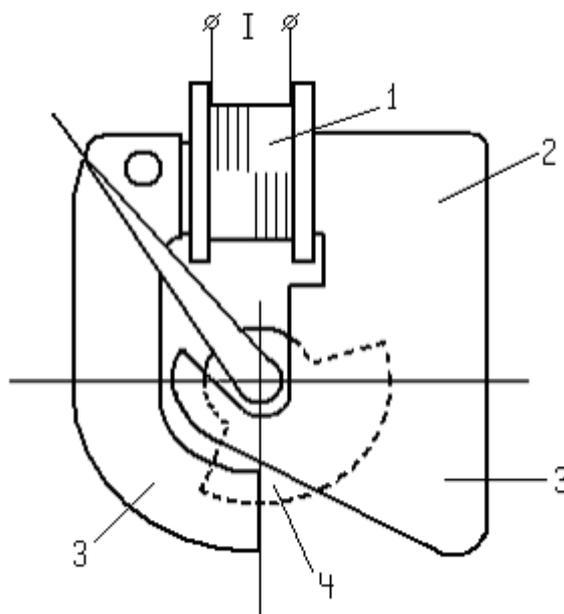


Рис 3.

- 1- катушка с током;
- 2- магнитопровод;
- 3- полюсные наконечники;
- 4- подвижный сердечник (с закреплённой на нём стрелкой).

В электромагнитных измерительных механизмах вращающий момент возникает в результате воздействия магнитного поля катушки, по обмотке которой протекает измеряемый ток, с одним или несколькими ферромагнитными сердечниками, обычно составляющими подвижную часть механизма.

Уравнение преобразования для электромагнитного преобразователя

$$\alpha_{эм} = \left(\frac{1}{2W}\right)\left(\frac{\partial L}{\partial \alpha}\right)I^2 ,$$

I – ток в обмотке, W - удельный противодействующий момент, L - индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

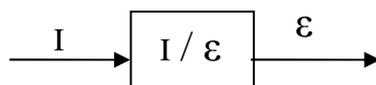
Характеристики - класс точности 0,5 - 1,0, предел измерений 10 мА – 100А.

Достоинства электромагнитных приборов – простота и надежность, хорошая перегрузочная способность и одинаковая пригодность для измерений в цепях постоянного и переменного токов.

Недостатки – большое собственное потребление энергии, невысокая точность, малая чувствительность, влияние внешних магнитных полей из-за слабого собственного магнитного поля.

Электромеханические измерительные приборы применяют для измерения тока, напряжения, мощности, сопротивлений и других электрических величин на постоянном и переменном токах преимущественно промышленной частоты 50 Гц.

2. Метод преобразования тока в ЭДС.



Принцип действия преобразователя Холла основан на использовании одноименного физического явления, заключающегося в появлении поперечной разности потенциалов (э. д. с. Холла) на краях проводящей пластины, помещенной в магнитное поле, при условии, что по пластине протекает электрический ток. Таким образом, э. д. с. Холла пропорциональна току через пластину I и магнитной индукции B :

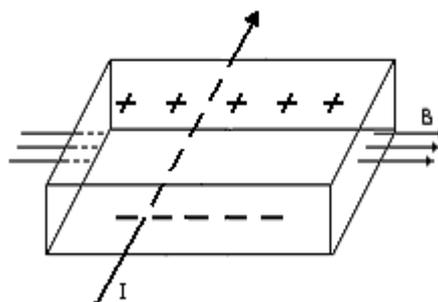


Рис 4.

$$\varepsilon_x = \kappa IB$$

Коэффициент Холла κ определяется свойствами полупроводникового материала, соотношением геометрических размеров преобразователя и режима работы.

$$\kappa = -A_x \cdot (n \cdot \mu_n^2 - p \cdot \mu_p^2) / e \cdot (n \cdot \mu_n - p \cdot \mu_p)^2, \text{ где}$$

A_x – коэффициент, зависящий от механизма рассеяния носителей заряда в кристаллической решетке

$A_x = 1 \div 1,93$; n, p – соответственно концентрация электронов и дырок;

μ_n, μ_p – их подвижности;

e – заряд электрона.

Как правило, для изготовления пластины Холла используют материалы с одним типом электропроводимости, преимущественно электронным.

Достоинства преобразователя Холла – высокая чувствительность по току, широкий диапазон рабочих температур, малый размер преобразователя.

Недостатки – погрешность от собственного магнитного поля, погрешность направленности, погрешность нестабильности.

3. Метод преобразования тока в термо- ЭДС.

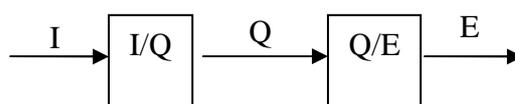


Рис.5

Термоэлектрические приборы состоят из термоэлектрического преобразователя, преобразующего измеряемый переменный ток в постоянное напряжение, и магнитоэлектрического измерительного механизма, проградуированного в значениях измеряемого тока. Термоэлектрические приборы преобразуют переменный электрический ток – его действующее значение- в тепло, а тепло в постоянную Э. д. с.

контактный термопреобразователь.

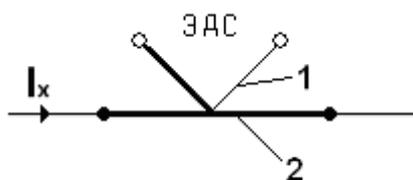


Рис 6.

1 – термопара; **2** – нагреватель.

В контактном термопреобразователе термопара имеет тепловой и гальванический контакт с нагревателем. В качестве нагревателя используется тонкая проволока, изготовленная из материала, допускающего длительные нагревы и имеющего низкий температурный коэффициент

сопротивления. К середине нагревателя приваривается рабочий конец термопары. К свободным концам термопары присоединяется магнитоэлектрический измерительный механизм.

Термо-э.д.с., развиваемая термопреобразователем, пропорциональна количеству теплоты, выделенному измеряемым током в нагревателе. Количество теплоты. В свою очередь, пропорционально квадрату действующего значения измеряемого тока. Ток в цепи ИМ $I = E/R$, где E - термо-э.д.с., R -сопротивление цепи рамки ИМ. Значит, показания термоэлектрического прибора будут пропорциональны квадрату действующего значения измеряемого тока.

$$E_T = kQ_T = \frac{kRn}{cA} Ix^2 = k' Ix^2, \quad \text{где:}$$

k - коэффициент, зависящий от материалов термоэлектродов термопары,

Ix - действующее значение преобразуемого тока,

c – коэффициент теплоотдачи,

A - поверхность охлаждения нагревателя,

Q_T - разность температур нагревателя и окружающей среды,

Rn – сопротивление нагревателя.

Характеристики - выпускаются многопредельные термоэлектрические приборы, предназначенные для измерения постоянных и переменных токов от 100 мкА до 100 А, напряжений – от 150 мВ до 600 В. Приборы работают в диапазоне от постоянного тока до частот 25 МГц.

Достоинства – высокая чувствительность к измеряемому току, большой диапазон измерения токов, широкий диапазон частот до 100 МГц, возможность измерения токов сигналов произвольной формы.

Недостатки – неравномерность шкалы, зависимость от внешней температуры и значительное собственное потребление мощности (на 5 А примерно 1 Вт), имеют тепловую инерцию и малая перегрузочная способность.

4. Метод преобразования тока в напряжение.



Для измерения очень малых токов применяется косвенный метод измерения токов – измерение тока по падению напряжения на высокоомном резисторе. Напряжение U снимается с резистора R включенного в цепь с измеряемого тока I_x . Значение тока находится по закону Ома:

$$I_x = U / R$$

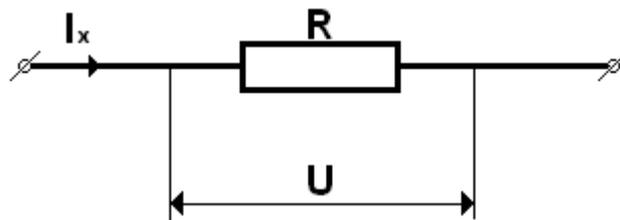


Рис 6.

Данный метод позволяет измерять большой диапазон токов, с достаточно большой точностью, что делает его достаточно приемлемым для разработчика. В данном случае этот метод наиболее удобен, для измерения переменного синусоидального тока с заданными пределами, в заданном частотном диапазоне и классом точности.

В остальных методах измерения также как и в данном случае переменный ток преобразуется в переменное напряжение и далее может быть преобразовано в частоту, длительность импульса и т. д. и т. п..

5. Осциллографический метод.

Осциллограф является прибором, реагирующим на изменение напряжения. Следовательно, любые физические величины, которые можно преобразовать в соответствующие изменения напряжения, могут быть исследованы с помощью осциллографа. Прибор может быть использован для непосредственного измерения напряжения и косвенного измерения тока по падению напряжения на резисторе с известным сопротивлением.

При использовании осциллографа в качестве амплитудного вольтметра измеряемое переменное напряжение подаётся на вход канала Y обычно при отключённом генераторе развёртки. Электронный луч при этом будет прочерчивать на экране вертикальную прямую линию, длина которой при синусоидальном измеряемом напряжении будет пропорциональна его удвоенной амплитуде: $ly = Su \cdot 2Um$. Зная чувствительность Su или коэффициент отклонения луча ko , можно найти

$$U = ko \cdot ly / 2 = ly / 2Su$$

Значение величины Su или ko может быть определено по положению рукоятки «Чувствительность» осциллографа или путём предварительной калибровки с помощью калибратора амплитуды. При необходимости оценить форму исследуемого напряжения включается генератор развёртки.

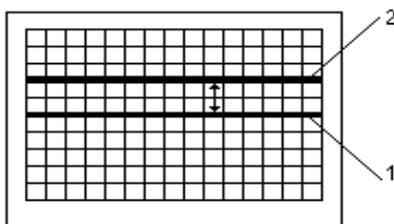


Рис 7.

1- нулевая линия

2- измеряемое напряжение

Указанным образом можно измерять только симметричное напряжение переменного тока или же напряжение постоянного тока.

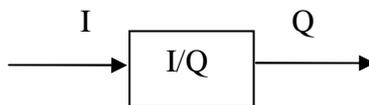
6. Метод косвенного преобразования тока во время.



Метод преобразования напряжения постоянного тока в прямо пропорциональный интервал времени с последующим измерением длительности интервала. В основе принципа действия лежит преобразование с помощью

АЦП измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, который затем преобразуется в число импульсов. Метод реализуется цифровыми приборами.

7. Метод преобразования тока – в заряд конденсатора.



При изменении малых постоянных токов широкое распространение получил метод интегрирования измеряемого тока. Сущность метода заключается в определении заряда на образцовом конденсаторе C_2 , создаваемого измеряемым током I_x за некоторое определенное время t_i .

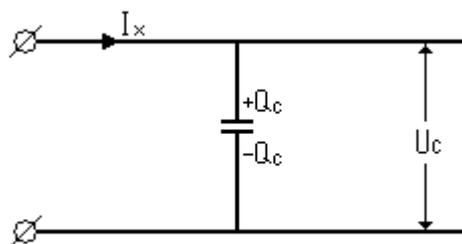


Рис 8.

Применение конденсатора в качестве образцового элемента позволяет достичь более высокой точности, так как погрешность аттестации и нестабильность, в течение длительного времени для конденсатора значительно меньше, чем для высокоомных резисторов. Среднее значение тока можно определить путем измерения напряжения на конденсаторе. Запишем систему уравнений для заряда:

$$dQ=Idt, \quad Q=CU, \quad \text{откуда:} \quad I_x = Q_c / t_i$$

I_x - ток цепи, Q_c - заряд конденсатора, C - емкость конденсатора, U_c - напряжение на обкладках конденсатора, t_i - время зарядки конденсатора.

Простейшие интеграторы тока представляют собой циклический прибор. В таких приборах после каждого цикла измерения требуют

возвращения схемы в исходное состояние, то есть требуется разряд интегрирующего конденсатора.

Методы сравнения.

Сравнение измеряемой величины с мерой происходит при любом измерение. Однако в приборах непосредственной оценки мера измеряемой величины в процессе измерения не используются. В этом случае измеряемая величина преобразуется в другую (промежуточную), которая сравнивается с мерой промежуточной величины, а мера измеряемой величины используется при градуировки прибора.

Таким образом, отличительной чертой методов сравнения является непосредственной участие мер в процессе измерения.

1. Компенсационный метод.

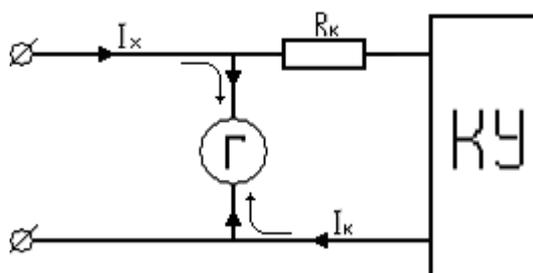


Рис 9.

Через гальванометр пропускаем измеряемый ток I_x затем через гальванометр пропускаем ток I_k противоположный по направлению I_x и добиваемся установки нуля на гальванометре. I_k регулируем с помощью сопротивления R_k , таким образом, зная R_k и U_k , найдём I_k . Так как $I_x = I_k$, то:

$$I_x = I_k = U_k / R_k$$

2. Метод косвенного измерения тока компенсатором посредством преобразования тока в напряжение

Чаще на практике применяют компенсаторы и ток измеряется по падению напряжения на образцовом сопротивлении.

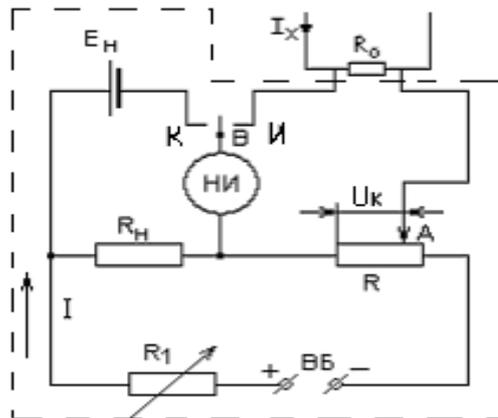


Рис 10.

E_N - нормальный элемент , э.д.с. которого известна (1,01865 В при нормальной температуре),

I_x –измеряемый ток,

$НИ$ - нуль-индикатор,

R_N - установочный резистор, сопротивление которого выбирается в зависимости от значения рабочего тока потенциометра и значения э.д.с. нормального элемента

I -рабочий ток, E_N - э.д.с. нормального элемента, R –декадное сопротивление, состоящее из нескольких декад по 9 резисторов каждая, R_1 –регулируемое сопротивление, для установки рабочего тока, $ВВ$ - вспомогательный источник тока

$$U_x = I_x R_0, \quad U_x = U_k, \quad I_x = U_k / R_0$$

3. Компараторный метод.

Компараторы приборы для косвенного сравнения друг с другом двух величин. С помощью соответствующих компараторов можно измерять переменные токи и напряжения путем сравнения их с постоянным током. Компараторы бывают как одновременного, так и разновременного сравнения. Основным элементом компаратора является преобразователь Π_1

(рис 10), выходная величина которого одинакова как при воздействии на вход измеряемой величины переменного тока, так и эквивалентного ей по действию постоянного тока. В качестве такого преобразователя могут быть использованы электростатические и электродинамические измерительные механизмы, выпрямительные и термоэлектрические преобразователи.

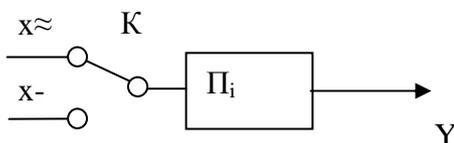


Рис.11. Структурная схема преобразователя

Наименьшая погрешность измерения напряжения и тока с помощью компараторов составляет 0.02%.

3.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИМЕР 1.

1. ВЫБОР МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ АМПЕРМЕТРА

Выбор метода измерения и структурной схемы определяется техническими данными проектируемого прибора.

Электронный амперметр переменного тока: предел измерения:

$I_x = 0 \div 2$ мА; класс точности 1,0%, частотный диапазон 20Гц- 1МГц,
входное сопротивление 0,1 Ома.

Амперметр разработан с использованием магнитоэлектрического механизма с данными:

$$\alpha_{II} = 100,$$

$$I_{II} = 100 \text{ мкА},$$

$$r_0 = 500 \text{ Ом},$$

$$U_{II} = I_{II} \cdot r_0 = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 500 = 50 \text{ мВ},$$

$$\gamma_B = 1.0 \% \text{ - класс точности измерительного}$$

механизма.

В данном частотном диапазоне частот можно использовать преобразование тока в напряжение с использованием образцового сопротивления – шунта.

Входное сопротивление амперметра определяет $r_{ш}=0,1$ Ом – сопротивление шунта в однопредельном амперметре. Коэффициент преобразования тока в напряжение можно выразить в виде $K_{ш}=0,1$ В/А.

Измеряемый ток преобразуется в переменное напряжение:

$$U_{\sim} = I_x \cdot r_{ш} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,2 \text{ мВ.}$$

Далее разрабатываем вольтметр переменного тока на 0,2 мВ.

Можно предложить следующую структурную схему.

Структурная схема:

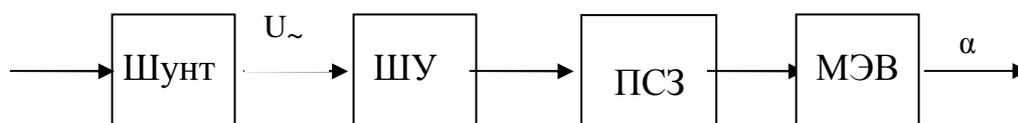


Рис.12

Рассмотрим принцип работы данной схемы и каждого элемента в отдельности:

Шунт – является образцовым резистором и служит для преобразования переменного тока в переменное напряжение;

Широкополосный усилитель (ШУ) – усиливает входной сигнал;

Преобразователь средних значений (ПСЗ)– необходим для преобразования переменного напряжения в постоянное;

Магнитоэлектрический вольтметр (МЭВ) - нужен для того, чтобы преобразовать напряжение в угол отклонения стрелки магнитоэлектрического механизма. Для визуального наблюдения результатов.

Градуировка по структурной схеме:

Уравнение шкалы:

$$\alpha_{\Pi} = K_{ш} \cdot K_{ШУ} \cdot K_{ПСЗ} \cdot K_{МЭВ} \cdot I_x ,$$

$$\alpha_{\Pi} = K_{ОБЩ} \cdot I_x$$

$$K_{ОБЩ} = \frac{\alpha_{\Pi}}{I_x} = \frac{100}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 500 \cdot 10^3 = K_{ш} \cdot K_{ШУ} \cdot K_{ПСЗ} \cdot K_{МЭВ}$$

2. ВЫБОР ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ:

При выборе принципиальной схемы необходимо обратить внимание на тот факт, что амперметры не имеют общей точки с корпусом прибора. Корпус амперметра заземляется, а схема не заземляется. Таким образом, усилитель, подключается к шунту по схеме – «усилителя с подавлением синфазного сигнала». В настоящее время разработаны специальные операционные усилители – инструментальные усилители, в которых оба входа выполнены симметрично относительно общей точки.

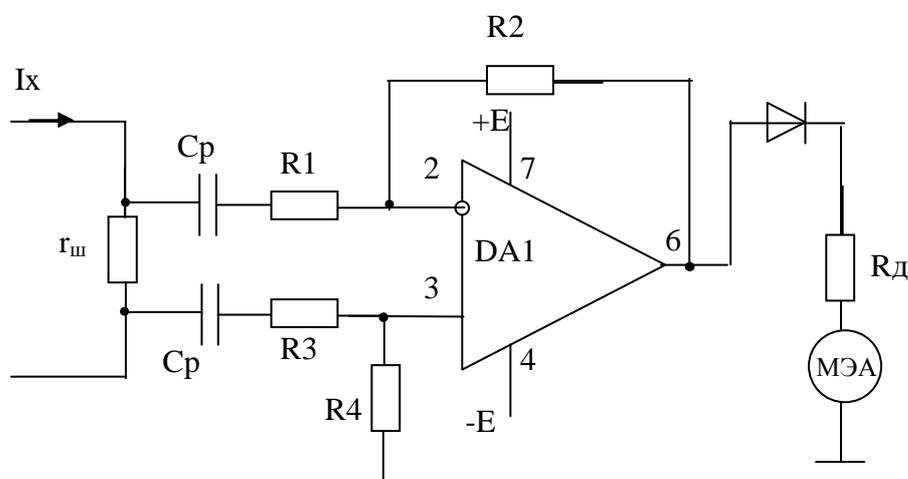


Рис.13

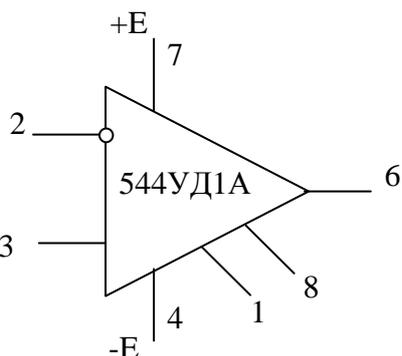
Выбор и расчет элементов принципиальной схемы:

Если ПСЗ выполнен пассивным, т.е. без усилителя, необходимо выполнить условие $U_{ВХПСЗ} \geq 3 \text{ В}$. В данном случае $U_{ВХПСЗ} = 3 \text{ В}$.

Выбор операционного усилителя:

Для данного усилителя используем операционный усилитель КР544УД1А. Принципиальная схема усилителя изображена на рисунке.

Усилитель 544УД1А.



Назначение ножек:

2 – инвертирующий вход.

3 – неинвертирующий вход.

7 – - E питание.

4 – + E питание.

4 – выход, 1, 8 – FC (частотная коррекция)

Краткая характеристика усилителя:

$U_{пит}, \text{В}$	$f_l, \text{МГц}$	K_0	$V, \text{В/мкс}$	$U_{см}, \text{мкВ}$	$\Delta U_{см}, \text{мкВ/}^\circ\text{C}$	$I_{потр}, \text{мА}$	$U_{вых}, \text{В}$	$R_H, \text{кОм}$
± 15	30	$30 \cdot 10^3$	2	50	50	3,5	10	2

При этом, должно выполняться данное соотношение:

$$K_{усил} = \frac{U_{ВХПСЗ}}{U_{\sim}} = \frac{3\text{В}}{0,2\text{мВ}} = 15000;$$

Определяем возможный максимальный коэффициент усиления на частоте 1 МГц.

$$K_{yc2MAX} = \frac{K_0}{1 + \frac{jk_o f}{f_1}} = \frac{f_1}{f} = \frac{30}{1} = 30$$

Для получения необходимого усиления 15000 необходимо включить 3 усилителя с коэффициентами усиления, например, 20, 25 и 30.

Первый усилитель выполнен по схеме подавления синфазного сигнала.

Пусть,

$R_2 = 2000 \text{ Ом}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, соответственно, $R_3 = 100$, $R_4 = 2000 \text{ Ом}$, так как

$$\text{должны выполняться условия: } K_{ДЕЛ} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Второй и третий усилители выполняются с несимметричными входами и с соответствующими коэффициентами усиления.

Расчет ПСЗ:

$$U_{\text{эф.вх.ПСЗ}} = 3 \text{ В}, \Rightarrow U_m = 3 \cdot \sqrt{2};$$

$$U_{\text{вых.ПСЗ}} = \frac{U_m}{\pi} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{3,14} = 1,35 \text{ В}$$

Расчет МЭВ:

$$r_0 = 500 \text{ Ом},$$

$$R_0 = \frac{U_X - I_{II} \cdot r_0}{I_{II}} = \frac{1,35 - 100 \cdot 10^{-6} \cdot 500}{100 \cdot 10^{-6}} = 12,5 \text{ кОм};$$

$$K_{МЭВ} = \frac{S_I}{R_0 + r_0}$$

$$S_I = \frac{\alpha_{II}}{I_{II}} = \frac{100}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^6$$

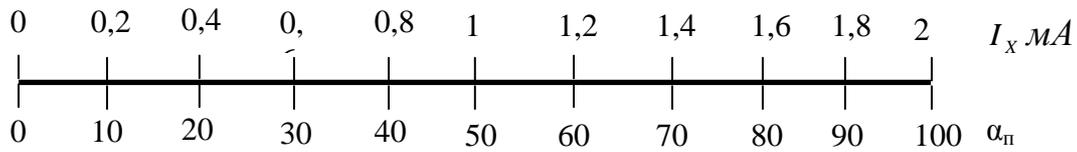
Уравнение шкалы:

$$\alpha_{II} = r_{III} \cdot K_{yc} \cdot K_{ПСЗ} \cdot K_{МЭВ} \cdot I_X$$

$$\alpha_{II} = 0,1 \cdot 15000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I}{R_0 + r_0} \cdot I_X$$

$I_X, \text{мА}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
------------------	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----	---

α_{II} , дел	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
---------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



Погрешность по принципиальной схеме:

$$\alpha_{II} = r_{III} \cdot K_{VC} \cdot K_{ПЗ} \cdot K_{МЭВ} \cdot I_X$$

$$\alpha_{II} = r_{III} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I}{r_0 + R_0} \cdot I_X$$

$$d\alpha_{II} = \frac{\partial \alpha}{\partial S_I} dS_I + \frac{\partial \alpha}{\partial r_{III}} dr_{III} + \frac{\partial \alpha}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial \alpha}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial R_0} dR_0 + \frac{\partial \alpha}{\partial r_0} dr_0$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial S_I} = r_{III} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_X}{R_0 + r_0}$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial r_{III}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I \cdot U_X}{R_0 + r_0}$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial R_2} = r_{III} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I \cdot U_X}{R_0 + r_0} \cdot \frac{1}{R_1}$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial R_1} = -r_{III} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I \cdot U_X}{R_0 + r_0} \cdot \frac{R_2}{R_1^2}$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial R_0} = -r_{III} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I \cdot U_X}{(R_0 + r_0)^2}$$

$$\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial r_0} = -r_{III} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S_I \cdot U_X}{(R_0 + r_0)^2}$$

Разделим каждую из этих частных производных на уравнение шкалы:

$$\frac{d\alpha_{II}}{\alpha_{II}} = \frac{dS_I}{S_I} + r_{III} \frac{dr_{III}}{r_{III}} + \frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_1}{R_1} - \frac{R_0}{R_0 + r_0} \cdot \frac{dR_0}{R_0} - \frac{r_0}{R_0 + r_0} \cdot \frac{dr_0}{r_0}$$

Запишем полный дифференциал через функции влияния:

$$\frac{d\alpha_{II}}{\alpha_{II}} = F_S \cdot \frac{dS_I}{S_I} + F_{r_{III}} + F_{R_2} \cdot \frac{dR_2}{R_2} - F_{R_1} \cdot \frac{dR_1}{R_1} - F_{R_0} \cdot \frac{dR_0}{R_0} - F_{r_0} \cdot \frac{dr_0}{r_0}$$

Функции влияния:

измерительного механизма: $F_S = 1$

сопротивления шунта: $F_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} = 0,1$

резисторов R_2 и R_1 : $F_{R_2} = F_{R_1} = 1$

$$\text{добавочного сопротивления: } F_{R_d} = \frac{R_d}{R_d + r_0} = \frac{1500}{2000} = 0,75$$

$$\text{внутреннего сопротивления ИМ: } F_{r_0} = \frac{r_0}{R_d + r_0} = 0,25$$

$$\frac{dS_I}{S_I} = 0,5\% \text{ - погрешность измерительного механизма.}$$

$$\frac{dR_d}{R_d} = 0,05\% \text{ - погрешность добавочного сопротивления (тип резистора С2-}$$

29В)

$$\frac{dr_0}{r_0} = 0,05\% \text{ - погрешность внутреннего сопротивления ИМ, тип резистора}$$

С2-29В

$$\frac{dr_u}{r_u} = 0,05\% \text{ - погрешность сопротивления шунта (тип резистора С2-29В)}$$

$$\frac{dR_2}{R_2} = \frac{dR_1}{R_1} = 0,05\% \text{ - погрешность сопротивлений усилителя, тип резистора}$$

С2-29В

$$\frac{d\alpha_n}{\alpha_n} = 1 \cdot 0,5\% + 0,1 \cdot 0,05\% + 1 \cdot 0,05\% - 1 \cdot 0,05\% - 0,75 \cdot 0,05\% - 0,25 \cdot 0,05\%$$

Приведённая погрешность равна:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha_n}{\alpha_n} &= \sqrt{(1 \cdot 0,5\%)^2 + (0,1 \cdot 0,05\%)^2 + (1 \cdot 0,05\%)^2 + (1 \cdot 0,05\%)^2 + (0,75 \cdot 0,05\%)^2 + (0,25 \cdot 0,05\%)^2} = \\ &= \sqrt{0,25\% + 0,000025\% + 0,0025\% + 0,0025\% + 0,0014\% + 0,0002\%} = 0,50\% \end{aligned}$$

Тогда класс точности амперметра 0,5%.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.

Введение

В настоящее время вольтметры переменного тока выполняются как с непосредственным сравнением измеряемого напряжения с известным напряжением, так и с промежуточным преобразованием переменного напряжения в напряжение постоянного тока.

Вольтметры со сравнением переменного напряжения U_x с известным напряжением постоянного тока U_k дают показания амплитудных значений U_x . В этих приборах напряжение U_k изменяется в соответствии с выбранным кодом до тех пор, пока оно не станет равным амплитудному значению U_x . Процесс сравнения может длиться несколько периодов.

В настоящее время наибольшее применение получили вольтметры с промежуточным преобразованием напряжения переменного тока в постоянное напряжение, измеряемое цифровым вольтметром постоянного тока. В этих вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется в пост. напряжение, пропорциональное либо среднему, либо амплитудному, либо действующему значению, в зависимости от типа используемого преобразователя. Основные характеристики таких вольтметров практически определяются свойствами преобразователей. Известны преобразователи с погрешностью не более $\pm 0.01\%$, а также преобразователи с верхним частотным диапазоном 30 МГц, но с большей погрешностью.

Для измерения амплитуды периодических импульсов применяют вольтметры, в которых сравнивается амплитуда импульсов с постоянным известным напряжением. Применяются также вольтметры с предварительным преобразованием амплитуды импульсов в напряжение постоянного тока с помощью “пиковых” детекторов.

В качестве примера укажем выпускаемый промышленностью щитовой вольтметр переменного тока типа Ф220 с верхними пределами измерения 1-10-100-500-1000В класса точности 1/0.5. Прибор имеет преобразователь переменного тока в постоянный. Имеется выход двоично-десятичного кода.

На переменном токе измеряемый сигнал имеет следующие характеристики:

1. амплитудное значение напряжения U_m
2. действующее значение напряжения U_d

$$U_d = U_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

3. среднее значение напряжения

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt$$

Амплитудное, среднее, действующее значение связаны между собой через коэффициент формы $K_{\phi} = U_m / U_d$ и коэффициент амплитуды $U_a = U_m / K_a$.

Методы непосредственной оценки измерения переменного напряжения.

При использовании метода непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно тому участку цепи, на котором измеряется напряжение. Для уменьшения методической погрешности измерения напряжения мощность потребления вольтметра должна быть мала, а его входное сопротивление велико. Поэтому в радиотехнических схемах при измерении в маломощных цепях предпочтительно использование электронных вольтметров.

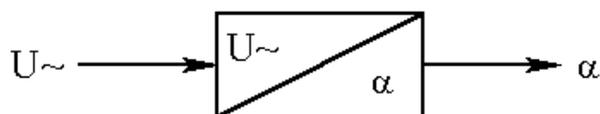
Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и магнитоэлектрического или цифрового измерительного прибора. Они в основном выполняются по двум структурным схемам:

входное устройство — усилитель переменного тока — преобразователь переменного напряжения в постоянное (детектор) — измеритель постоянного напряжения или входное устройство — преобразователь переменного напряжения в постоянное — усилитель постоянного тока (УПТ) — измеритель. Вольтметры характеризуются высокой чувствительностью, но сравнительно узким диапазоном частот вследствие сложности разработки широкополосных усилителей. Известны вольтметры, построенные по этой структурной схеме, с диапазоном частот 2 Гц - 100 МГц.

***1. Метод преобразования переменного напряжения в угол отклонения.
Метод преобразования переменного напряжения в угол отклонения с помощью электростатического измерительного механизма.***

Электростатические измерительные приборы измеряют среднеквадратичное значение напряжения. Эти приборы по принципу действия механизма являются вольтметрами. Достоинства электростатических приборов: широкий частотный диапазон (до 30 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи принцип действия электростатического механизма, метод основан на взаимодействии электрически заряженных проводников.

Структурная схема данного метода



Физическая основа метода измерения поясняется на устройстве электростатического электромеханического преобразователя, изображенного на рисунке 2.

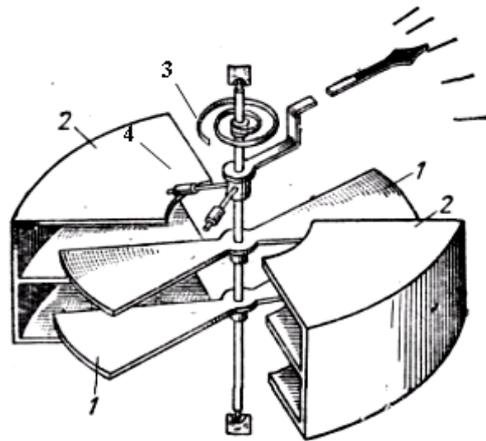


Рис. 14. Устройство электростатического механизма.

- 1- Алюминиевые пластины подвижной части;
- 2- Неподвижная часть прибора (состоит из одной или нескольких камер, чем больше камер, тем выше чувствительность прибора);
- 3- Ось, на которой крепится подвижная часть;
- 4- Упругий элемент.

Вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной. Отклонение подвижной части связано с изменением емкости.

Если к подвижным пластинам (1) жестко укрепленных на оси (3) и неподвижным пластинам (2) подвести измеряемое напряжение, то они окажутся заряженными противоположными по знаку зарядами, в результате чего под действием электростатических сил притяжения подвижные пластины будут стремиться войти внутрь камер. Это вызовет закручивание упругих элементов (4), создающих противодействующий момент. При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть остановится, и по положению указателя на шкале (5) можно будет определить измеряемое напряжение.

Выражение для угла отклонения подвижной части электростатического измерительного механизма может быть получено на основании следующих рассуждений.

Энергия электрического поля системы заряженных тел определяется по

формуле:

$$W_e = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

На основании выражения для вращающего момента получим:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}$$

Если противодействующий момент создается при помощи упругих элементов, то для режима установившегося равновесия

$$\frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha} = W \cdot \alpha, \text{ откуда}$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}, \text{ где}$$

W - Удельный противодействующий момент;

U - Напряжение приложенное к системе;

C - Емкость системы заряженных тел.

Достоинства: Приборы электростатического типа имеют высокое входное сопротивление, малую, но переменную входную емкость, малую мощность потребления, широкий частотный диапазон. Данные приборы могут использоваться в цепях переменного и постоянного тока. Показания приборов соответствуют среднеквадратическому значению измеряемой величины, и показания не зависят от формы кривой измеряемого сигнала.

Данные механизмы используются для измерения напряжений в широком диапазоне частот (20Гц – 30МГц) в маломощных цепях, а также в цепях высокого напряжения для измерения напряжений до десятков и сотен киловольт без применения добавочных сопротивлений, потребляющих

большую мощность. По точности эти приборы соответствуют чаще всего классам 1,0-1,5-2,5. Также существуют приборы с достаточно высокими классами точности, такими как 0,1 и даже 0,05.

Недостатки: Приборы имеют квадратичную шкалу, малую чувствительность из-за слабого электростатического поля и невысокую точность. Кроме того, приборы требуют применения экрана и не исключают возможность электрического пробоя.

2. Метод косвенного преобразования переменного напряжения в угол отклонения.

. Метод преобразования переменного напряжения с помощью электродинамического измерительного механизма.

Электродинамические измерительные приборы применяются для измерения переменных токов до 10 А, переменных напряжений до 600 В и мощности от долей вата до нескольких киловатт, как на постоянном так и на переменном токе промышленных частот (50Гц, 400Гц).

Структурная схема данного метода представлена на рисунке .

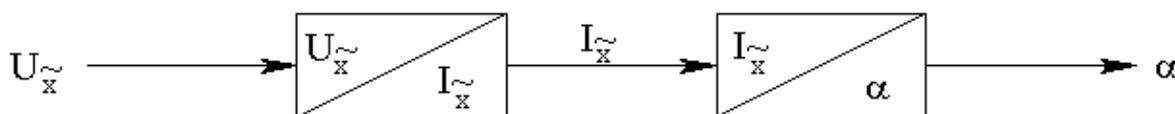


Рис.14. Структурная схема вольтметра с электродинамическим преобразователем.

Физическая основа метода измерения поясняется на устройстве динамического преобразователя, изображенного на рисунке 4.

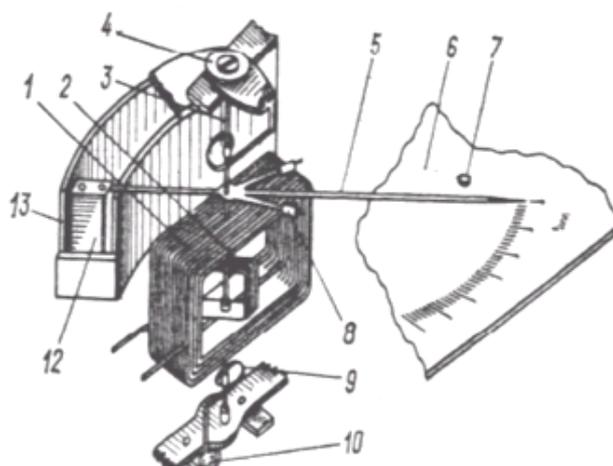


Рис.15. Устройство электродинамического механизма.

В электродинамических ИМ вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами. Измерительный механизм имеет вид, показанный на рис. 4.

В электродинамических измерительных механизмах элементом подвижной части, участвующим в создании вращающего момента $M_{вр}$, является рамка (2), намотанная тонким проводом. На осях (3) укреплены подвижные части механизмов. Ось (3) снабжена на концах кернами и может поворачиваться в подпятниках (4). Чтобы увеличить затухание и уменьшить время установления показаний в механизмах применяются специальные устройства - успокоители. В качестве успокоителя применено крыло (12), которое при повороте подвижной части, расходует энергию, перегоняя воздух в камере (13) из одной части в другую. Для включения обмотки подвижной катушки в цепь измеряемого тока используются пружинки или растяжки (9). При наличии тока в обмотках катушек ИМ возникают силы, стремящиеся повернуть подвижную часть так, чтобы магнитные потоки подвижных и неподвижных катушек совпадали.

Определим вращающий момент электродинамического измерительного механизма.

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot I_2^2 + I_1 I_2 \cdot M_{1,2} - \text{электромагнитная}$$

энергия двух контуров с токами, где L_1 и L_2 – индуктивности неподвижных и подвижных катушек; $M_{1,2}$ – взаимная индуктивность между ними

Индуктивности катушек не зависят от угла поворота, поэтому

$$M_{вр} = I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \theta \cdot \frac{dM}{d\alpha},$$

где: $M_{вр}$ – вращающий момент;

I_1 – ток через неподвижную катушку;

I_2 – ток через подвижную катушку;

θ – фазовый сдвиг между синусоидальными токами,

M – коэффициент взаимной индуктивности катушек.

Если противодействующий момент создается с помощью упругих элементов, то для режима установившегося отклонения

$$I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = W \cdot \alpha,$$

откуда выражение для угла отклонения выглядит:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \theta \cdot \frac{dM}{d\alpha}$$

На основе электродинамического механизма в зависимости от схемы соединения обмоток могут выполняться вольтметры, амперметры, ваттметры.

Достоинством электродинамических вольтметров и амперметров является высокая точность на переменном токе (класс точности до 0,05). Предел основной приведенной погрешности может быть 0,1...0,2 %, что является наилучшим показателем для измерительных приборов переменного тока. По другим показателям электродинамические приборы близки к электромагнитным. Электродинамические приборы используются как образцовые лабораторные измерительные приборы.

Также к достоинствам приборов на основе электродинамического

измерительного можно отнести: возможность использования в цепях постоянного и переменного тока. На переменном токе угол отклонения пропорционален действующему значению измеряемой величины. Частотный диапазон до 20 кГц.

К недостаткам относятся меньшая по сравнению с магнитоэлектрическими приборами чувствительность, ощутимое влияние внешних магнитных полей (для уменьшения этого влияния измерительный механизм прибора помещают в металлический экран), сравнительно большое потребление мощности.

3..Метод измерения переменного напряжения с использованием электромагнитного механизма.

Электромагнитные измерительные приборы применяют как измерители тока в цепях переменного тока промышленной частоты, в качестве щитовых приборов классов 1,0 и 1,5 и лабораторных классов 0,5 и 1,0. использование их в цепях повышенной и высокой частоты недопустимо из-за больших дополнительных частотных погрешностей.

Структурная схема данного метода представлена на рисунке 5.

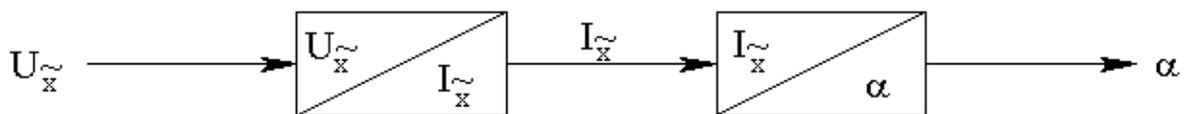


Рис.15. Структурная схема вольтметра с электромагнитным преобразователем.

Данный метод можно реализовать при помощи электромагнитного механизма. Принцип действия данной системы основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Сердечник втягивается в катушку при любой полярности протекающего по ней тока. Это обусловлено тем, что ферромагнетик располагается в магнитном поле катушки так, что поле усиливается. Следовательно, прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе.

Принцип работы: Катушка (1) на нее наматывается медный провод в ней воздушный зазор, в который входит укрепленный на оси (3) сердечник (2). При наличии тока в катушке (1) сердечник стремится расположиться в месте с наибольшей концентрацией поля, т.е. втягивается в зазор катушки.

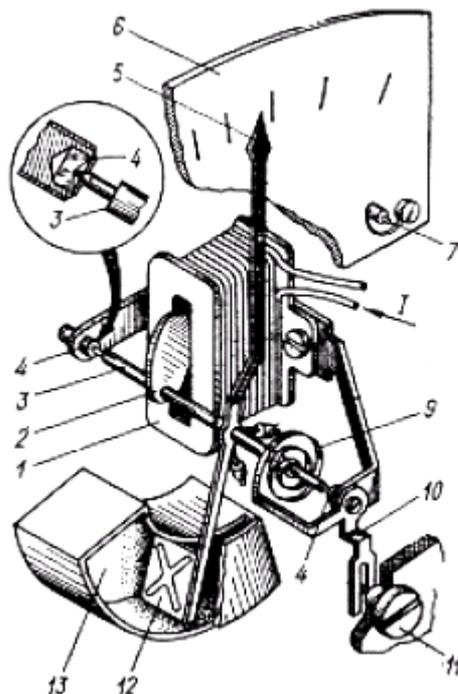


Рис1.6. Устройство электромагнитного механизма.

При этом закручиваются пружинки (9), следовательно, возникает противодействующий момент. Для успокоения движения подвижной части применяют воздушные успокоители, он состоит из камеры (13) и крыла (12)

6- шкала прибора

5- стрелка- указатель

7- упор (предназначен, чтобы уберечь стрелку от повреждений)

Выражение для угла отклонения можно записать на следующем основании:

$$W_e = \frac{L \cdot I^2}{2} - \text{электромагнитная энергия катушки, по обмотке которой}$$

протекает ток.

Выражение для вращающего момента будет:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}$$

Если противодействующий момент создается с помощью упругих элементов, то для режима установившегося отклонения

$$\frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha} = W \cdot \alpha, \text{ откуда}$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot W} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}$$

где : L-индуктивность катушки

W-удельный противодействующий момент

На практике применяют амперметры (ЭМС) с пределами измерения от долей ампера до 200 А, и вольтметры - от долей вольта до сотен вольт. Также приборы ЭМС используют в качестве щитовых приборов классов 1,0 и 1,5 и лабораторных классов 0,5 и 1,0. В некоторых случаях они используются для измерений на повышенных частотах: амперметры до 8000 Гц, вольтметры до 400 Гц.

Достоинства: Простота конструкции, способность выдерживать значительные перегрузки, возможность градуировки приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока, на постоянном токе.

Недостатки: К недостаткам приборов данной системы можно отнести большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние

Промышленностью выпускаются приборы на токи $0 \dots 100\text{А}$, на напряжения $0 \dots 600\text{В}$, с классами точности 1 и ниже и частотным диапазоном до 1000 Гц.

Для более точных приборов применяют экранирование для защиты от влияния магнитных полей.

4. Метод преобразования переменного напряжения в термо ЭДС.

Данный метод является косвенным, структурная схема метода представлена на рисунке 17.

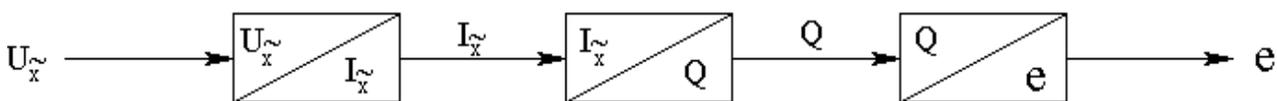


Рис.17. Структурная схема преобразования переменного напряжения в термо ЭДС.

Сущность метода поясняется по схеме, приведенной на рисунке 8.

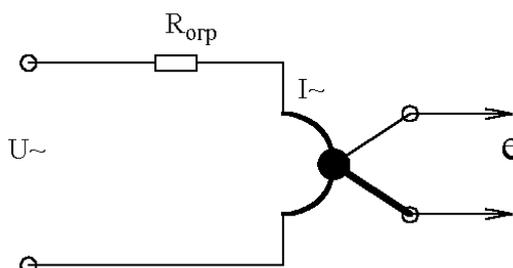


Рис.1 8. Схема преобразования переменного напряжения в термо ЭДС.

Принцип действия термоэлектрических измерительных преобразователей основан на двух физических явлениях: выделение тепла при прохождении по проводнику электрического тока и появлении ЭДС постоянного тока при нагреве места соединения двух различных металлов.

По принципу действия термоприборы являются измерителями тока, протекающего по нагревателю термопреобразователя. При протекании по нагревателю измеряемого тока I_X выделяется тепло, под действием которого нагревается сплав термопары, а на ее холодных концах возникает термо ЭДС. Термо ЭДС E_T пропорциональна количеству теплоты Q , выделяемому нагревателем $\Rightarrow E_T = K_1 \cdot Q$. Количество теплоты в свою очередь пропорционально квадрату измеряемого тока $\Rightarrow Q = I^2 \cdot K_2$.

Величина тока в цепи измерительного механизма:

$$I_H = \frac{E_T}{r} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot I_X}{r}$$

Где r – полное сопротивление цепи измерительного механизма.

Угол отклонения подвижной части прибора:

$$\alpha = S_I \cdot I_H = S_I \cdot \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot I_X}{r} = K \cdot I_X^2$$

где S_I – чувствительность измерительного механизма.

K - постоянный коэффициент, зависящий от свойств термопары и параметров ИМ.

5. Метод измерения переменного напряжения осциллографическим методом.

Осциллограф является прибором, реагирующим на изменение напряжения. При использовании осциллографа в качестве амплитудного вольтметра измеряемое переменное напряжение подается на вход Y , обычно при отключенном генераторе развертки. Электронный луч при этом будет прочерчивать на экране вертикальную прямую линию, длина которой, при синусоидальном измеряемом сигнале напряжения будет пропорциональна его удвоенной амплитуде: $L_{ц} = S_U \cdot 2U_{MAX}$.

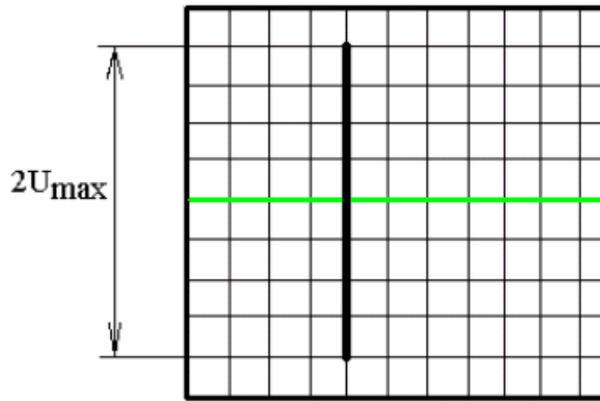


Рис.19 Экран осциллографа

Зная чувствительность S_U или коэффициент отклонения луча K_0 можно определить:

$$U_M = \frac{L_{II}}{2} \cdot K_0 = \frac{L_{II}}{2 \cdot S_U}$$

Значения величин S_U и K_0 может быть определено по положению рукоятки “Чувствительность” осциллографа.

Точность измерения напряжения с помощью осциллографа невелика, погрешность составляет 5-10% от измеряемой величины.

6. Методы преобразования переменного напряжения в постоянное.

Преобразователи переменного напряжения в постоянное (детекторы) можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное:

Детектор амплитудных (пиковых) значений;

Детектор среднеквадратического значения;

Детектор среднев्यпрямленного значения.

Структурная схема для данных преобразователей представлена на рисунке 10.

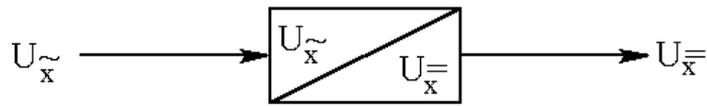


Рис. 20. Структурная схема детекторов.

Тип детектора во многом определяет свойства прибора: вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднего квадратичного значения позволяют измерять напряжение любой формы; вольтметры средневыпрямленного значения измеряют только гармонические сигналы, но являются самыми простыми и надежными.

7. Метод преобразования переменного напряжения в постоянное с помощью детектора амплитудных значений.

Амплитудный детектор - устройство, напряжение на выходе которого соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого напряжения. Схема амплитудного детектора представлена на рис.2.

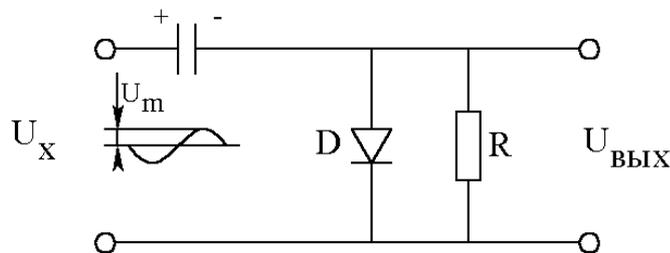


Рис.21. Схема детектора амплитудных значений.

Временные диаграммы детектора, изображенного на рис. 2. представлены на рис. 3.

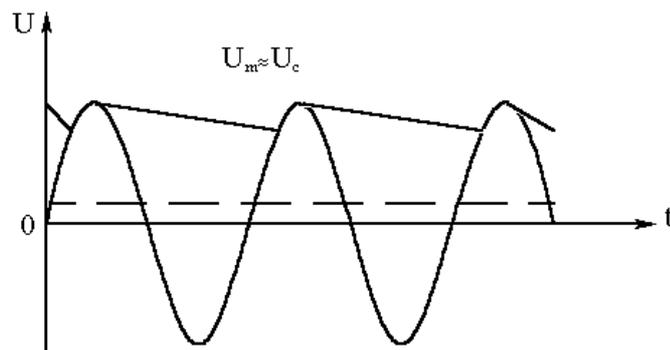


Рис.22. Временные диаграммы детектора амплитудных значений.

Принцип работы: Рассмотрим работу детектора при подаче на его вход гармонического напряжения $U_x(t) = U_x \sin \omega t$

На интервалах времени, когда на вход детектора поступает положительная полуволна, конденсатор С заряжается через диод, сопротивление R_0 которого в открытом состоянии мало. Постоянная времени заряда $\tau_z = R_0 C$ невелика и заряд конденсатора до максимального значения U_m происходит быстро. На интервале действия отрицательной полуволны диод закрыт и конденсатор С медленно разряжается на сопротивлении нагрузки R_n так как оно выбирается достаточно большим (50... 100 МОм).

Постоянная разряда $\tau_p = R_n C$ оказывается значительно больше периода $T = 2\pi/\omega$ входного переменного напряжения. В результате конденсатор останется заряженным до напряжения, близкого к $U_C = U_m = U_{\text{вых}}$. (Рис.11)

Чем меньше период исследуемого сигнала (чем выше частота), тем точнее выполняется равенство $U_C = U_m$. Этим объясняются высокочастотные свойства детектора.

8. Метод преобразования переменного напряжения в постоянное с помощью детектора средних значений.

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период:

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| \cdot dt, \text{ где}$$

T - Период напряжения сети;

Среднее значение U_{sin} таким образом равняется $\frac{2U_m}{\pi} \approx 0.632 \cdot U_m$

На рисунке 23. изображен детектор средних значений. Временные диаграммы данного детектора представлены на рисунке 25.

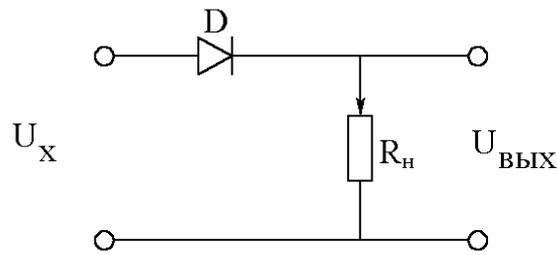


Рис.23. Схема детектора средних значений.

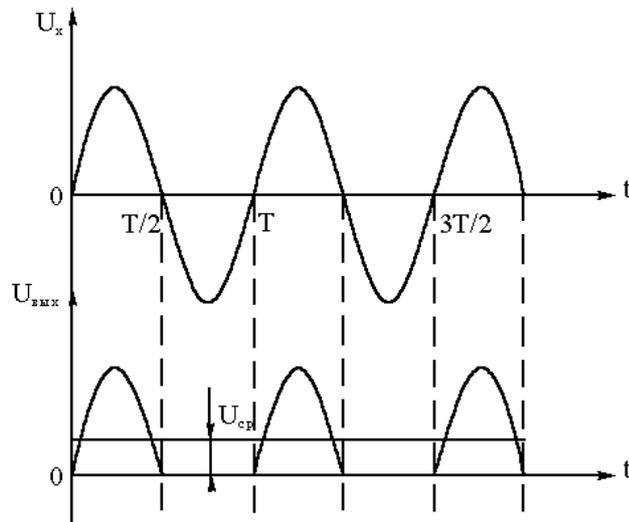


Рис.24. Временные диаграммы детектора средних значений.

В данном примере рассмотрен однополупериодный выпрямитель. В таком выпрямителе ток через нагрузку протекает лишь в течение полупериода, так как ток через диод протекает лишь в одном направлении (Рис.24.). Для приведенной схемы преобразователя постоянное напряжение будет равно $U_{\text{ср}} = 0.5 \cdot \frac{2U_m}{\pi}$, так как преобразователь однополупериодный. Детектор работает в пределах до нескольких десятков МГц, в зависимости от подобранных диодов, погрешность преобразователь высока (3-4%).

9.. Метод преобразования переменного напряжения в постоянное с помощью детектора действующих значений.

Действующее значение напряжения определяется как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U_{д} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt}.$$

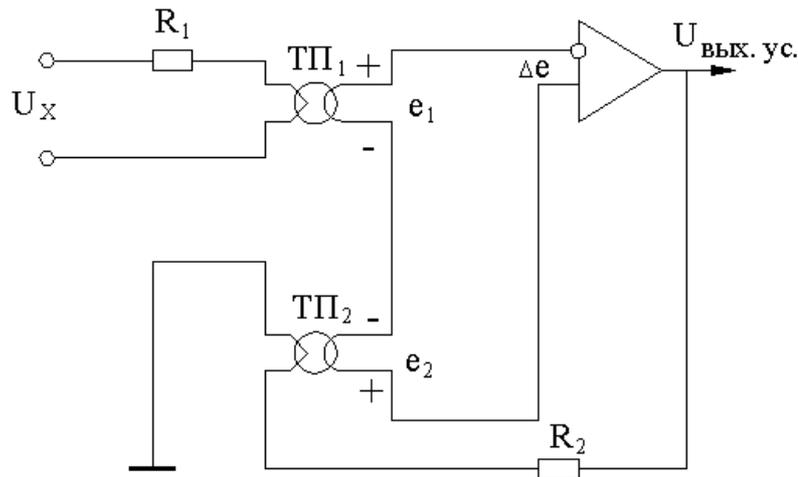


Рис.25. Схема детектора действующих значений.

Пусть $R_1 = R_2$

На термопару $ТП_1$ подаем измеряемое напряжение $U_{x\sim}$ в результате этого

возникает ток термопары I_1 : $I_{ТП1} = \frac{U_x}{R_1}$

Происходит выделение тепла $Q_{ТП1}$ - это количество тепла, которое выделяется в нагревателе за период T .

$$Q_{ТП1} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{m1}^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot (t) \cdot R_1 \cdot dt$$

Первая термопара выполняет функции квадратора и интегратора

ЭДС возникшее на первом термопреобразователе ℓ_1 будет равно:

$$\ell_1 = k_{Т1} \cdot I_1^2$$

$k_{Т1,2}$ - коэффициенты, зависящие от свойств термопреобразователей.

При поступлении на термопару ТП₂ напряжения $U_{\text{вых ус}}$ возникает ток термопары I_2 равный:

$$I_{n2} = \frac{U_{\text{вых ус}}}{R_2}$$

Происходит выделение тепла $Q_{\text{ТП2}}$:

$$Q_{\text{ТП2}} = I_{n2}^2 \cdot R_2 \cdot T$$

ЭДС возникшее на втором термопреобразователе ℓ_2 будет равно:

$$\ell_2 = k_2 \cdot I_{n2}^2,$$

Термопара является корнеизвлекающим устройством. Так как коэффициент усиления усилителя стремится к бесконечности, его входной сигнал $\Delta \ell = \ell_1 - \ell_2 \approx 0$, следовательно:

$$\ell_1 = \ell_2$$

$$k_{T1} \cdot I_{n1}^2 = k_{T2} \cdot I_{n2}^2$$

$$\left(\frac{U_x}{R_1}\right)^2 \cdot k_{T1} = \left(\frac{U_{\text{вых ус}}}{R_2}\right)^2 \cdot k_{T2}$$

$$\sqrt{k_{T1}} \cdot \frac{U_x}{R_1} = \sqrt{k_{T2}} \cdot \frac{U_{\text{вых ус}}}{R_2}$$

$$U_x = \sqrt{\frac{k_{T2}}{k_{T1}}} \cdot U_{\text{вых ус}}$$

Считая ТП одинаковыми постоянное напряжение на выходе $U_{\text{вых}} =$ равно действующему значению входного сигнала $U_{\text{вх}}$.

Характеристики: данная схема работает до частот 200 – 400 МГц с погрешностью измерения менее 1%, ТП необходимо подбирать для каждого случая.

10. Метод пространственного кодирования для измерения переменного напряжения.

Структурная схема данного метода представлена на рисунке:

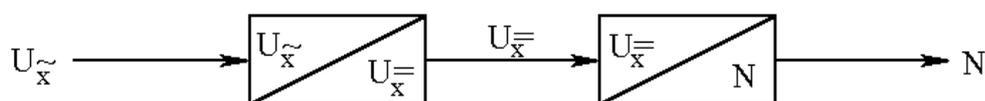


Рис.26. Структурная схема метода пространственного кодирования.

Для преобразования переменного напряжения в цифровой эквивалент, необходимо, сначала преобразовать его в постоянное, при помощи детектора, а потом в код, в данном случае при помощи приборов с пространственным кодированием.

Приборы с пространственным кодированием выполняются на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ), экран которой имеет специальную кодирующую маску.

Принцип работы прибора:

- 1) U_x . Подается с входного устройства на пластины 1
- 2) По сигналу запуска генератор линейно изменяющегося напряжения развертывает U_x в горизонтальную линию, отстоящую от нулевого уровня на расстоянии $L \sim U_x$.

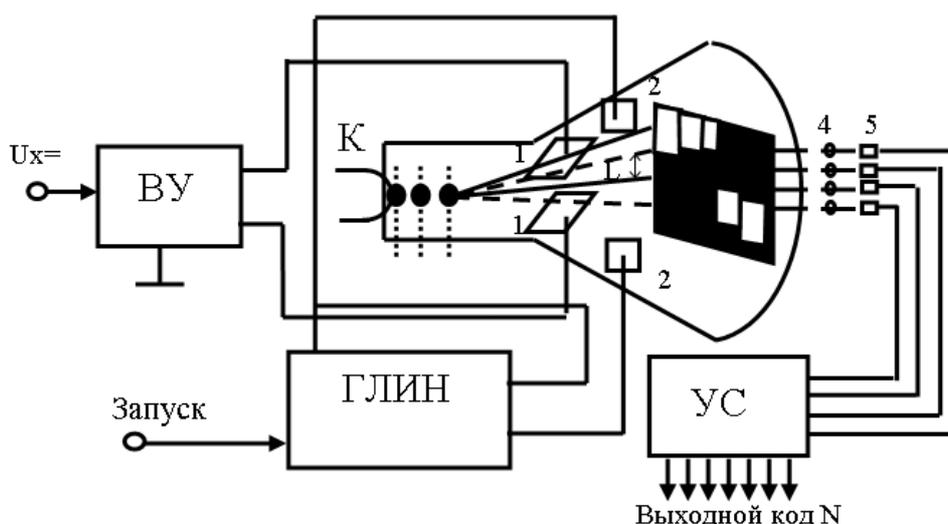


Рис.27. Функциональная схема данного метода.

Где: U_x - входное напряжение;

ВУ - входное устройство;

ГЛИН - генератор линейно изменяющегося напряжения;

УС- усилитель считывания;

К- катод.

Взаимосвязи выходного кода N и входного напряжения U_x определяется выражением:

$$N = k_1 \cdot k_2 \cdot U_x + \Delta,$$

k_1 - коэффициент, связывающий линейный размер L и значение кода;

k_2 - коэффициент, связывающий напряжение на пластинах $U_{откл}$ и расстояние L , на которое перемещается линия пересечения луча с маской под действием этого напряжения;

Δ - единица младшего разряда.

Достоинства данного метода: достоинство АЦП с пространственным кодированием - высокое быстродействие, достигающее $(1-5) \cdot 10^8$ преобразований. Погрешность преобразования при этом не превышает 1%.

Методы сравнения для измерения переменного напряжения.

1. Компенсационный метод измерения переменного напряжения.

Принцип действия компенсатора переменного тока заключается в том, что измеряемая ЭДС уравнивается известным напряжением, создаваемым рабочим током на участке сопротивления рабочей цепи.

Для уравнивания двух напряжений переменного тока необходимо равенство этих напряжений по модулю, противоположность по фазе, равенство частоты и идентичность формы кривой.

Компенсаторы переменного тока разделяются на две группы:

полярно – координатные;

прямоугольно - координатные.

1.1. Измерение переменного напряжения с помощью полярно-координатного компенсатора переменного тока.

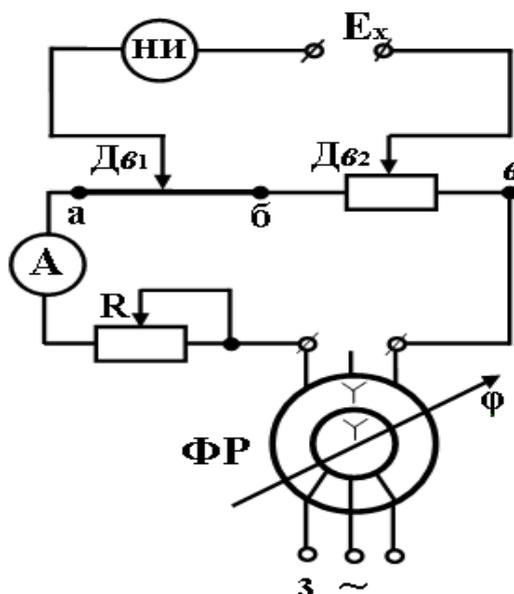


Рис. 28. Схема полярно-координатного компенсатора.

Компенсатор снабжен фазорегулятором ФР, с помощью которого производится изменение фазы компенсирующего напряжения до момента компенсации.

Измеряемое напряжение подключается к зажимам E_x . Напряжение определяется по положению указателя движков $D_{\epsilon 1}$ и $D_{\epsilon 2}$ на шкале калиброванной проволоки $a - б$ и магазина сопротивлений $б - в$. Фаза напряжений на участке рабочей цепи регулируется фазорегулятором ФР, благодаря чему можно добиться практически полного отсутствия тока в нулевом индикаторе НИ. Отсчет сдвига фазы производится по фазорегулятору. Необходимое значение рабочего тока устанавливается по амперметру A при помощи реостата R .

Недостатки метода: Компенсаторы переменного тока по точности измерений значительно уступают компенсаторам постоянного тока. Это объясняется тем, что не существует меры Э.Д.С. переменного тока, аналогичной нормальному элементу. Рабочий ток в компенсаторах переменного тока приходится устанавливать по приборам ограниченной точности, обычно по амперметрам в лучшем случае класса точности 0,05 или 0,1.

1.2. Измерение переменного напряжения с помощью прямоугольно-координатного компенсатора переменного тока.

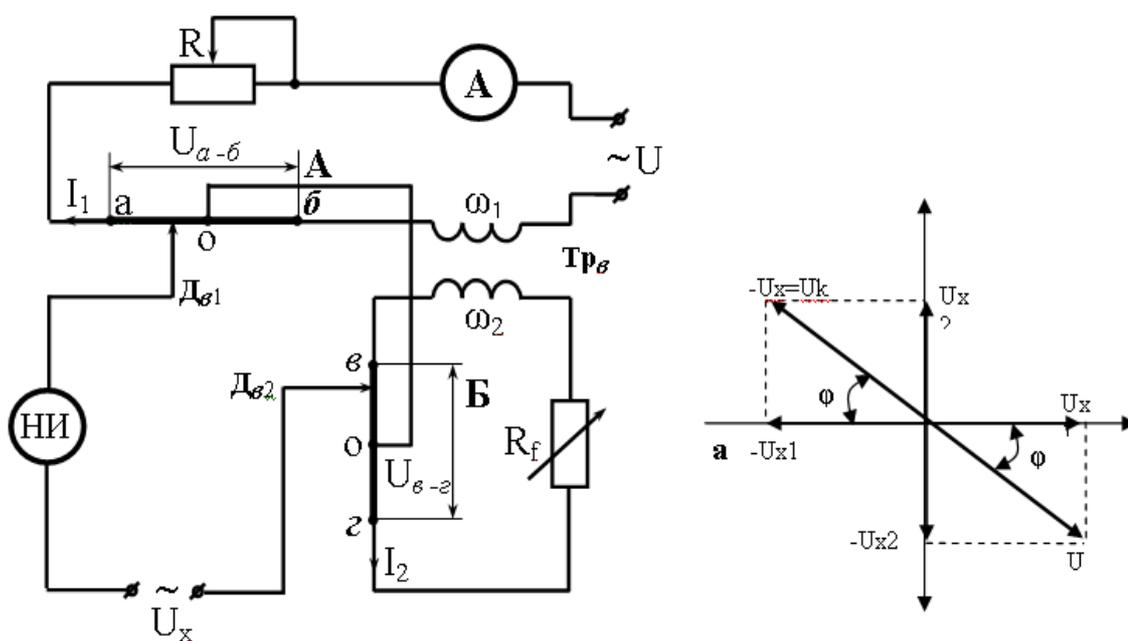


Рис.29. Схема (а) и векторные диаграммы (б) прямоугольно-координатного компенсатора.

Потенциометр имеет две рабочие цепи А и Б. Рабочая цепь А состоит из калиброванной проволоки а – б, первичной обмотки ω_1 “воздушного” трансформатора Tr_B , амперметра А и реостата R. Ток I_1 в этой цепи создает на калиброванной проволоке а – б падение напряжения U_{a-b} . Так как ток I_1 устанавливается заданного значения, то напряжение U_{a-b} будет определяться сопротивлением R_{a-b} калиброванной проволоки а – б, шкала которой может быть отградуирована в единицах напряжения. Вторая рабочая цепь Б состоит из калиброванной проволоки в – з, вторичной обмотки ω_2 “воздушного” трансформатора Tr_B и магазина сопротивлений R_f . Ток I_2 протекающий во второй рабочей цепи, отстает по фазе от тока почти на 90° . Объясняется это тем, что при незначительном индуктивном сопротивлении вторичной цепи трансформатора Tr_B ток I_2 будет практически совпадать по фазе с ЭДС E_2 и, следовательно, отставать по фазе на 90° от тока I_1 . Падение напряжения $U_{в-з}$ на сопротивлении $R_{в-з}$ калиброванной проволоки в – з, создаваемое током I_2 при постоянном значении тока I_1 и частоте f будет так же постоянным. Таким образом, шкалу калиброванной проволоки в – з так же можно проградуировать в единицах напряжения. Поскольку сопротивления $R_{в-з}$ и R_{a-b} проволок чисто активные, то напряжения $U_{в-з}$ и U_{a-b} совпадут по фазе с токами, но будут сдвинуты относительно друг друга на 90° . Обычно значение тока I_2 при неизменном значении тока I_1 зависит от частоты, так как

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{\omega M}{R_2} I_1,$$

где:

ω - угловая частота тока

M – коэффициент взаимной индуктивности воздушного трансформатора

R_2 - полное активное сопротивление второй рабочей цепи, включая и сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

Главная входная цепь компенсатора состоит из источника измеряемого напряжения U_x , нуль - индикатора НИ и участков калиброванных проволок $D_{\beta_1} - 0$ и $D_{\beta_2} - 0$.

На координатных осях отложены падения напряжений на участках $D_{\beta_1} - 0$ и $D_{\beta_2} - 0$. При отсутствии тока в нуль- индикаторе геометрическая сумма этих падений напряжений равна по модулю измеряемому напряжению U_x , но сдвинута по отношению к нему на 180° .

1.3. Косвенный метод измерения переменного напряжения компенсационным методом.

Компенсаторы (потенциометры) - приборы, в которых измерение производится методом сравнения измеряемой величины с эталоном. Принцип действия основан на уравнивании измеряемого напряжения известным падением напряжения на образцовом резисторе. Момент полной компенсации фиксируется индикаторным прибором (нуль - индикатором).

В технике точных измерений широкое распространение получили компенсационные методы измерения напряжения переменного (постоянного) тока в широком диапазоне частот. В компенсационных методах измеряемую величину сравнивают с известной величиной, воспроизводимой или измеряемой средствами измерений с высокой точностью, с помощью прибора сравнения. Переменное напряжение предварительно преобразуется в постоянное напряжение.

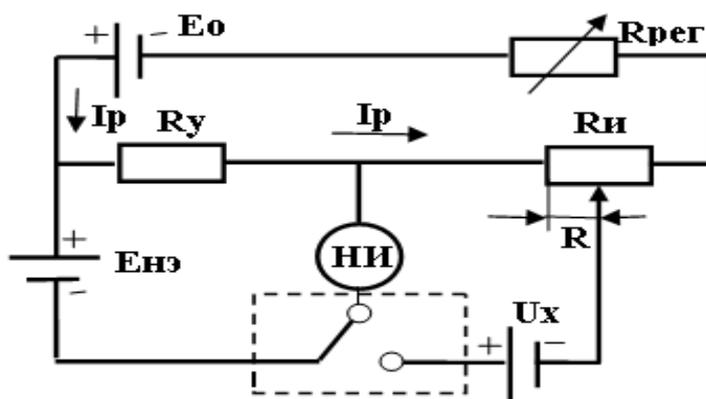


Рис.30. Принципиальная схема компенсатора постоянного тока.

1) Положение переключателя (1): при помощи $R_{\text{рег}}$ устанавливаем

$$I_{\text{ни}}=0, \rightarrow I_p R_y = E_{\text{ни}}, \quad I_p = E_{\text{ни}} / R_y.$$

2) Положение переключателя (2): изменяя R_x устанавливаем

$$I_{\text{ни}}=0, \rightarrow U_x = I_p R_x = E_{\text{ни}} R_x / R_y.$$

Источник постоянного напряжения E_0 обеспечивает протекание рабочего тока I_p по цепи, состоящей из последовательно включенных измерительного R_x , установочного (образцового) R_y и регулировочного $R_{\text{рег}}$ резисторов. В качестве источника образцовой ЭДС используется нормальный элемент $E_{\text{нэ}}$ - изготавливаемый по специальной технологии гальванический элемент, среднее значение ЭДС которого при температуре 20°C известно с точностью до пятого знака и равно $E_{\text{нэ}} = 1,0186$ В.

Достоинства: измеряемое напряжение определяется с достаточно высокой точностью и без нарушения работы измерительной цепи, т.к. в момент измерения ток через индикатор не протекает.

Современные потенциометры постоянного тока имеют класс точности от 0,0005 до 0,2. Верхний предел измерения до 1...2,5 В. При достаточной чувствительности нуль-индикатора нижний предел измерения может составлять единицы нановольт.

2. Компараторный метод измерения переменного напряжения.

В приборах сравнения используются также компараторы, сравнивающие механическое воздействие, создаваемое измеряемой величиной переменного тока, с воздействием постоянного тока, измерение которого можно осуществлять с высокой точностью. В электромеханических компараторах сравниваются электромеханические моменты, вызываемые изменением электромагнитной энергией постоянного и переменного токов, с использованием для создания указанных

компараторов моментов измерительных механизмов электростатической системы. Электромеханические компараторы осуществляются как компараторы разновременного и одновременного сравнения.

Более совершенным является метод одновременного сравнения, при котором преобразователь реагирует одновременно на измеряемую величину на переменном токе и эквивалентное ее значение на постоянном токе. Положение равновесия подвижной части преобразователя при любом конструктивном исполнении и любой системе уравнивания определяется равенством нулю суммы моментов, действующих на подвижную часть.

Вращающий и противодействующий моменты должны быть равны ($M_1=M_2$) и направлены навстречу друг другу. Регулировкой постоянного тока достигают равенства этих моментов. Измеряемый в момент компенсации постоянный ток является мерой измеряемого переменного тока.

Наиболее простым способом реализации метода одновременного сравнения является использование электростатического измерительного механизма- квадрантного электрометра, позволяющего непосредственно сравнивать переменное напряжение с постоянным. Между одной парой квадрантов и подвижным электродом подается измеряемое напряжение переменного тока U_1 , а между второй парой квадрантов и подвижным электродом – напряжение постоянного тока U_2 , по значению которого судят о значении измеряемого напряжения переменного тока. В момент равенства напряжений указатель электрометра находится на нулевой отметке шкалы.

Для построения измерительных устройств высокой точности применяются двухэлементные измерительные механизмы, при этом возможен ряд сочетаний измерительных механизмов. Электростатические измерительные механизмы могут использоваться совместно с любой другой измерительной системой. Практическую реализацию нашли сочетания

электростатического и магнитоэлектрического механизмов или двух электростатических механизмов.

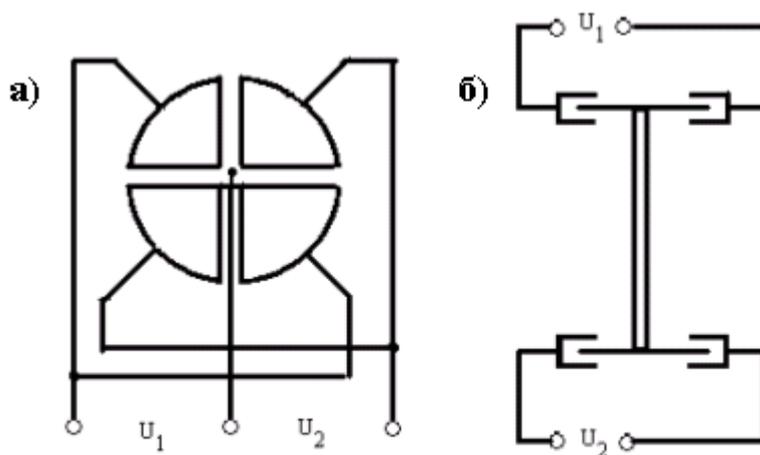


Рис.31. Схема включения компараторов моментов одновременного сравнения на основе квадрантного электрометра (а) и двух элементов измерительных механизмов (б).

2.1. Термоэлектрические компараторы.

Термоэлектрические компараторы характеризуются широкой независимостью от частоты и способностью измерять при стационарных процессах среднеквадратические значения токов и напряжений независимо от формы кривой измеряемых сигналов.

Компараторы одновременного сравнения на электротепловых преобразователях содержат масштабный преобразователь, компаратор одновременного сравнения, состоящий из термоэлектрических преобразователей типа ТВБ-4 и усилителя постоянного тока с МДМ-преобразователем, и магнитоэлектрический механизм.

Упрощенная функциональная схема автоматического компаратора одновременного сравнения на основе термопреобразователя приведена на рис.2.73. Измеряемое напряжение U_x усиливается усилителем U_1 и управляет

ЭДС термопреобразователя ТП1 сравнивается с ЭДС термопреобразователя ТП2, который питается от источника стабильного постоянного напряжения $U_{оп}$. Разность термо-ЭДС термопреобразователей усиливается УПТ У2 и управляет реверсивным счетчиком РС. Реверсивный счетчик, в свою очередь, управляет металлопленочным резистором R2 в цепи ООС усилителя У1 таким образом, что показания счетчика пропорциональны проводимости $1/R2$. Показания счетчика фиксируются цифровым отсчетным устройством ЦОУ. При достаточно большом коэффициенте усиления усилителей выходное напряжение U1 усилителя У1 поддерживается практически постоянным, близким $U_{оп}$. В то же время $U1=(R2/R1)*U_x$. Отсюда $U_x=(R1/R2)*U1$, т.е. показания счетчика будут пропорциональны измеряемому напряжению U_x .

Достоинства: приборы, основанные на таком принципе, имеют достаточно высокую точность измерения (0,05%), широкий частотный (от 20 Гц до 700 кГц) и динамический (от 1 мВ до 1100 В) диапазоны измерений.

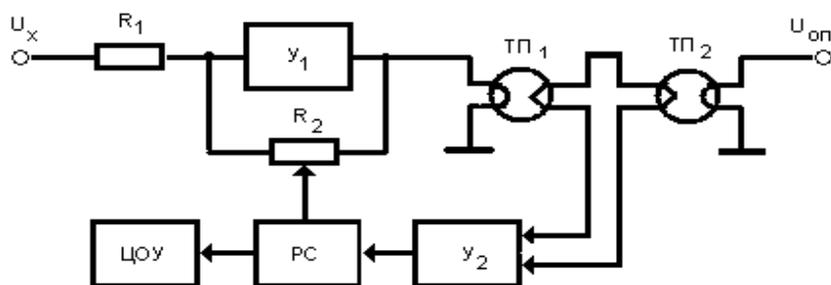


Рис.32. Функциональная схема автоматического компаратора одновременного сравнения на основе термопреобразователей.

U_x – измеряемое напряжение;

$U_{лин}$ - линейно изменяющееся напряжение;

УС, УС2 - устройство сравнения;

Т- триггер;

ГСИ - генератор счетных импульсов.

4.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПРИМЕР 1.

Электронный вольтметр постоянного тока.

1. Исходные данные:

$$U_x = 200 \text{ мВ}$$

$$R_{вх} = 1 \text{ МОм}$$

$$\gamma_{осн} = 1.0\%$$

2. Выбираем МЭМ:

Магнитоэлектрический механизм М476

Внутреннее сопротивление $r_0 = 500 \text{ Ом}$

Ток полного отклонения $I_{п} = 100 \text{ мкА}$

Класс точности механизма 0.5

3. Определяем напряжение полного отклонения.

$$U_n = I_n \cdot r_0 = 500 \cdot 10^{-4} = 50 \text{ мВ}$$

Усилитель нам не нужен, т.к. предел измерения удовлетворяет $U_{п}$.

4. Структурная схема прибора:

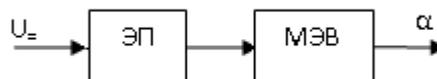


Рисунок 1. Структурная схема вольтметра постоянного тока.

$$\alpha = K_{ЭП} \cdot K_{МЭВ} \cdot U_x$$

где:

ЭП - Повторитель

МЭВ – Магнитоэлектрический вольтметр.

Повторитель нужен чтобы, обеспечить заданное входное сопротивление.

Магнитоэлектрический вольтметр нужен чтобы, измерить постоянное напряжение с выхода.

5. Градуировка прибора.

На выходе 100 делений, на входе 200 мВ, тогда общий коэффициент преобразования определяется из уравнения преобразования :

$$\alpha = k_{общ} * U_x$$

$$k_{общ} = \frac{100}{U_x} = \frac{100}{0.2} = 500$$

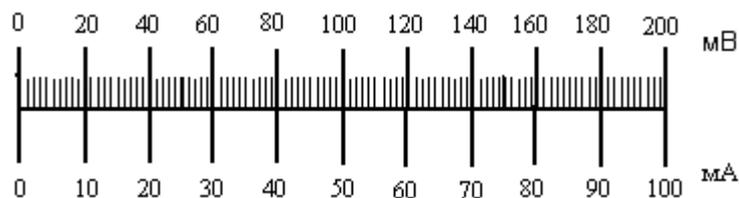


Рисунок. 2 Шкала вольтметра постоянного тока.

6.Разобъём $K_{общ}$ на составляющие:

$$K_{ЭП}=1, \quad K_{МЭВ}=500.$$

7. Выбор и расчет элементов принципиальной схемы.

7.1. Первоначальные данные проекта.

$$U_{ВХ}=200\text{мВ}.$$

$$\gamma=1.0\%$$

$$R_{ВХ}=1\text{МОм}$$

7.2.Схема повторителя.

$$K_{П}=1$$

$$U_{ВХ}=U_{ВЫХ}$$

$$R_{ВХ}=1\text{Мом}$$

В качестве ОУ возьмем ОУ К140УД17 Электрические параметры которого:

$$K_y=150000, \quad e_{см}=0.25\text{ мВ}, \quad R_H=2\text{ кОм}.$$

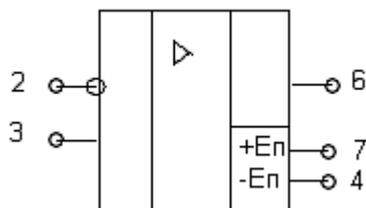


Рисунок 3. ОУ К140УД17.

Рисунок. 4 Принципиальная схема повторителя.

7.2. Расчет магнитоэлектрического вольтметра

Принципиальная схема МЭВ представлена на (Рисунке 5) .

$$U_{вх} = 200 \text{ мВ}$$

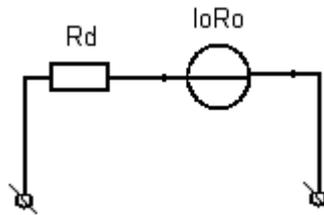


Рисунок 5. Магнитоэлектрический вольтметр

Магнитоэлектрический механизм М476

Внутреннее сопротивление $r_0 = 500 \text{ Ом}$

Ток полного отклонения $I_n = 100 \text{ мкА}$

Класс точности механизма 0.5

$$S_I = \frac{N}{I_n} = \frac{100}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^6$$

$$R_d = \frac{U_{вх}}{I_n} - r_0 = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{10^{-4}} - 500 = 1.5 \text{ кОм}$$

$$R_d = 1500 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{МЭВ}} = 2000 \text{ Ом}$$

Выбираем резисторы которые имеют погрешность не более 0.5% из E192-ряда типоминал С2-29В.

8. Принципиальная схема прибора:

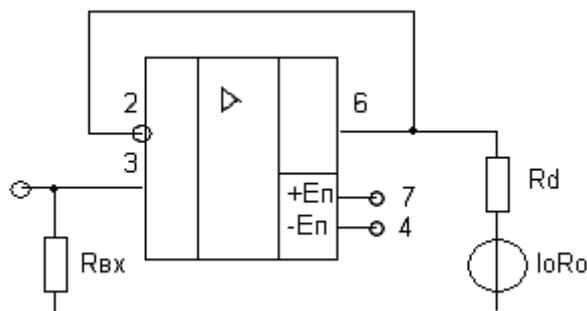


Рисунок. 6 Принципиальная схема вольтметра постоянного тока.

9. Установим класс точности прибора.

$$\alpha = K_{эн} \cdot K_{МЭМ} \cdot U_X$$

$$\alpha = \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot U_X$$

$$K = \frac{S_I}{(R_d + r_0)}$$

$$dK = \frac{dS_I \cdot S_I}{(R_d + r_0) \cdot S_I} - \frac{S_I \cdot dR_d \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2 \cdot R_d} - \frac{S_I \cdot dr_0 \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2 \cdot r_0}$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot \gamma_{МЭМ} - \frac{S_I \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{R3} - \frac{S_I \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{МЭМ}^2 + \frac{R_d^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{R3}^2 + \frac{r_0^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}^2}$$

$$\gamma = \sqrt{0,25 + \frac{1440000}{2890000} \cdot 0,25 + 0} = \sqrt{0,49} = 0,7$$

Рассчитаем мультипликативную погрешность всего прибора $\gamma=0,7$.

Выбираем из ряда класс точности 1.0.

ПРИМЕР 2.

Электронный вольтметр переменного тока.

1. Исходные данные:

$U_X=200\text{мВ}$,

$\gamma_{осн}=1.0\%$

$R_{ВХ}=1\text{МОм}$

$f_{min}=20\text{Гц}$

$f_{max}=1\text{МГц}$

2. Выбираем МЭМ:

Магнитоэлектрический механизм М476

Внутреннее сопротивление $r_0=500\text{ Ом}$

Ток полного отклонения $I_{п}=100\text{мкА}$

Класс точности механизма 0.5

3. Определяем напряжение полного отклонения.

$$U_n = I_n \cdot r_0 = 500 \cdot 10^{-4} = 50\text{мВ}$$

Переменный ток нужно выпрямлять и если использовать пассивный ПЭС с коэффициентом передачи 0,45, потребуется усилитель.

4. Структурная схема прибора:

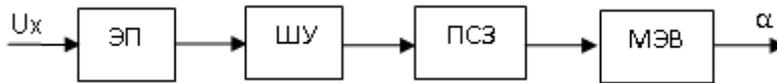


Рисунок 1. Структурная схема вольтметра постоянного тока.

$$\alpha = K_{\text{ЭП}} \cdot K_y \cdot K_{\text{МЭВ}} \cdot U_x$$

где:

ЭП – Повторитель.

ШУ- широкополосной усилитель.

ПСЗ- преобразователь среднего значения.

МЭВ – Магнитоэлектрический вольтметр.

Повторитель нужен чтобы, обеспечить заданное входное сопротивление.

ПСЗ необходим для преобразования переменного напряжения в постоянный.

Магнитоэлектрический вольтметр нужен чтобы, измерить постоянное напряжение с выхода.

5. Градуировка прибора.

На выходе 100 делений, на входе 200 мВ, тогда общий коэффициент преобразования определяется из уравнения преобразования

$$\alpha = k_{\text{общ}} * U_x$$

$$k_{\text{общ}} = \frac{100}{U_x} = \frac{100}{0.2} = 500$$

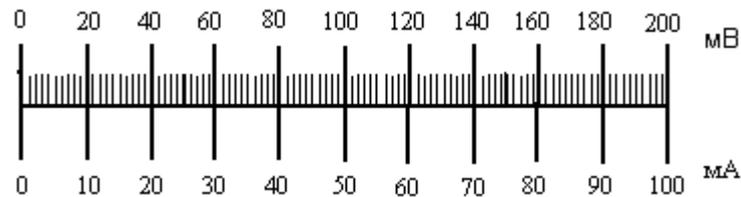


Рисунок. 2 Шкала вольтметра переменного тока.

6. Разобьем общий коэффициент передачи, и дадим каждому звену цепи определенное значение.

$$K_{\text{п}}=1, K_y=11, K_{\text{ПСЗ}}=0,45, K_{\text{МЭВ}}=101$$

7. Выбор и расчет элементов принципиальной схемы.

7.1. Первоначальные данные проекта.

$$U_{\text{вх}}=200\text{мВ.}$$

$$\gamma=1.0$$

$$R_{\text{вх}}=1\text{МОм}$$

$$f_{\text{min}}=20\text{Гц}$$

$$f_{\text{max}}=1\text{МГц}$$

7.2.Схема повторителя.

$K_{п}=1$

$R_{вх}=1 \text{ Мом}$

В качестве ОУ возьмем ОУ К140УД17 Электрические параметры которого:

$$K_{у}=150000, e_{см}=0.25 \text{ мВ}, R_{н}=2 \text{ кОм}, E_{+}=3 \div 18 \text{ В}, E_{-}=-3 \div 18 \text{ В}$$

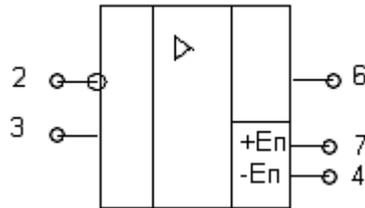


Рисунок 3. ОУ К140УД17.

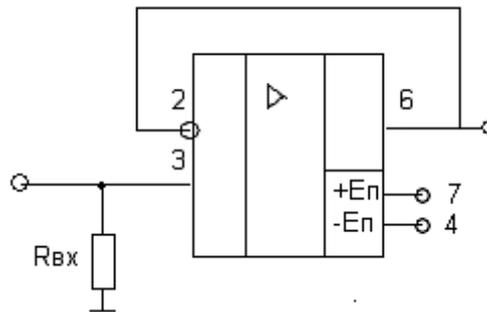


Рисунок. 4 Принципиальная схема повторителя.

7.3.Выбор и расчет усилителя напряжения

Выбираем усилитель переменного тока, который должен отвечать поставленным требованиям $K_{у}>11$, полоса пропускания не меньше 1МГц. Рассчитаем частоту единичного усиления f_1 для $K_0=10000$. Из формулы:

$$K_w = \frac{K_0}{1 + \frac{j \cdot f_p \cdot K_0}{f_1}}$$

$$f_1 = \frac{j \cdot K_w \cdot f_p \cdot K_0}{K_0 - K_w} = \frac{11 \cdot 10^6 \cdot 10^4}{10^4} \approx 11 \cdot 10^6 \text{ Гц} \approx 11 \text{ МГц}$$

В качестве ОУ возьмем ОУ КР1407УД1 Электрические параметры которого:

$$K_{у}=10000, e_{см}=10 \text{ мВ}, R_{н}=2 \text{ кОм}, f_1=20 \text{ МГц}, E_{+}=3 \div 12 \text{ В}, E_{-}=-3 \div 12 \text{ В}$$

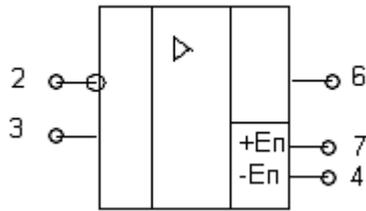


Рисунок 5. ОУ КР1407УД1.

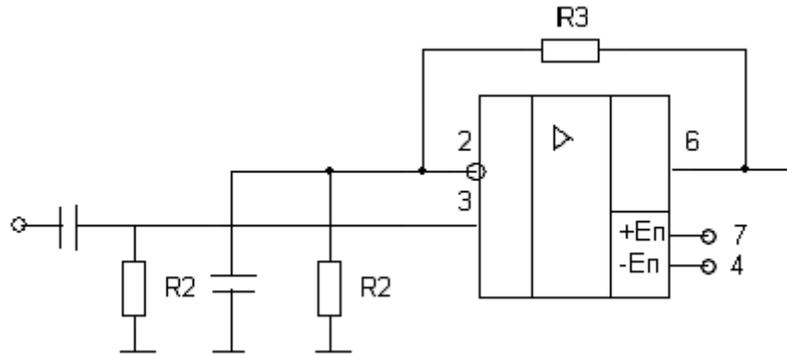


Рисунок. 6 Принципиальная схема усилителя.

Рассчитаем коэффициент усиления который должен быть не менее $K_y=11$.

Рассчитаем номиналы резисторов (R_2, R_3, R_4) и конденсаторов (C_1, C_2).

$$R_{BX} = R_5 = 1MO\Omega$$

$$K_y = \frac{R_4}{R_3} + 1$$

$$K_y - 1 = \frac{R_4}{R_3}$$

Выбираем резисторы которые имеют погрешность не более 0.5% из E192-ряда

$$R_3=4.3 \text{ кОм и } R_4=43 \text{ кОм}$$

Для компенсации частотной погрешности ставим добавочную ёмкость (C_2).

Возьмем $C_4=1 \text{ пФ}$ и $C_3=1 \text{ пФ}$ и определим частотную погрешность.

$$\gamma_w = \frac{(K_w - K_0)}{K_0} \cdot 100\%$$

$$K_w = \frac{Z_4}{Z_3} + 1 = \frac{R_4 \cdot (1 + jw\tau_3)}{R_3 \cdot (1 + jw\tau_4)} + 1 = \frac{43000 \cdot 1.03}{4300 \cdot 1.27} + 1 = 9.1$$

$$\gamma_w = \frac{(9.1 - 11)}{11} \cdot 100\% = 17.2\%$$

Теперь определим C_2 .

$$\tau_3 = \tau_4$$

$$R_3 \cdot (C_3 + C_2) = R_4 \cdot C_4$$

$$C_2 = \frac{R_4 \cdot C_4}{R_3} - C_3 = \frac{43000 \cdot 10^{-12}}{4300} = 9 \text{ нФ}$$

7.4. Расчет преобразователя средних значений

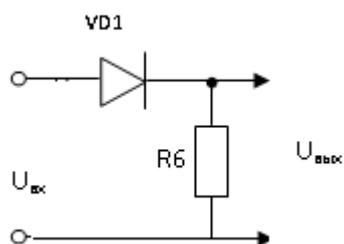


Рисунок 7 преобразователь средних значений

Определим U_{cp}

$$U_{cp} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{вх}}{\pi}$$

$$U_{cp} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2,2}{\pi} = 1В$$

$$U_{cp} = 1В$$

$$K_n = \frac{U_{ввых}}{U_{вх}} = 0,45$$

Выберем диод: КД102

$I_{пр} = 50$ мА,

$I_{обр} = 0,1$ мкА,

$U_{пр} = 1$ В,

$U_{обр} = 250$ В,

$$R_{ПР} = \frac{U_{ПР}}{I_{ПР}} = 200\text{Ом}$$

$$R_{ОБР} = \frac{U_{ОБР}}{I_{ОБР}} = 2,5\text{ТОм}$$

$$R_{омт} = \sqrt{R_{ПР} \cdot R_{ОБР}} = 224\text{кОм}$$

7.5. Расчет магнитоэлектрического вольтметра

Принципиальная схема МЭВ представлена на (Рисунке 5) .

$$U_{вх} = 1В$$

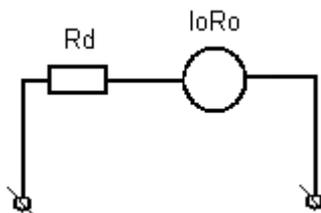


Рисунок 8. Магнитоэлектрический вольтметр

$$S_I = \frac{N}{I_n} = \frac{100}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^6$$

$$R_d = \frac{U_{ax}}{I_n} - r_0 = \frac{1}{10^{-4}} - 500 = 9.5 \text{ kOM}$$

$$R_d = 9500 \text{ Ом}$$

$$R_{мЭВ} = 100000 \text{ Ом}$$

Выбираем резисторы которые имеют погрешность не более 0.5% из E192-ряда

8. Принципиальная схема прибора:

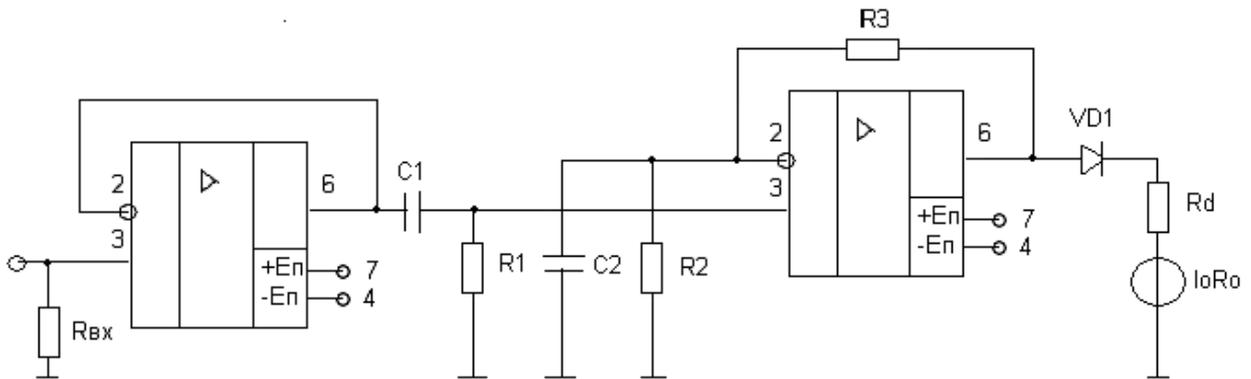


Рисунок 9. Магнитоэлектрический вольтметр

9. Установим класс точности прибора.

Рассчитаем мультипликативную погрешность всего прибора по принципиальной схеме.

$$\alpha = K_{эн} \cdot K_y \cdot K_{мЭВ} \cdot U_X$$

$$\alpha = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot U_X$$

$$dK = \frac{dR_4 \cdot R_4}{R_2 \cdot R_4} - \frac{dR_3 \cdot R_4}{R_3^2} + \frac{dS_I \cdot S_I}{(R_d + r_0) \cdot S_I} - \frac{S_I \cdot dR_d \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2 \cdot R_d} - \frac{S_I \cdot dr_0 \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2 \cdot r_0}$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{R_4}{R_3} \gamma_{R3} - \frac{R_4}{R_3} \cdot \gamma_{R4} + \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot \gamma_{МЭВ} - \frac{S_I \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{R3} - \frac{S_I \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{МЭВ}^2 + \frac{R_d^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{Rd}^2 + \frac{r_0^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}^2 + \gamma_{R4}^2 + \gamma_{R3}^2} = \sqrt{0.48 + 0.49} = 0.98$$

Выбираем из ряда класс точности 1.0.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОММЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Обзор методов измерения сопротивления.

Методы непосредственной оценки.

1.1 Метод преобразования сопротивления в интервал времени

Структурная схема преобразователя сопротивления в интервал времени имеет вид:



Принцип работы:

В исходном положении переключатель находится в положение 0, конденсатор заряжен до напряжения U_0 , выходной сигнал сравнивающего устройства (СУ) имеет нулевой уровень. Сигнал начала измерения (момент времени t_1) переводит переключатель в положение 1, при этом напряжение на не инвертирующем входе СУ в первый момент времени превышает напряжение, действующее на инвертирующем входе, и выходной сигнал СУ принимает единичный уровень. В процессе разряда конденсатора напряжение на не инвертирующем входе непрерывно падает и в момент времени, когда оно окажется ниже $e^{-1} \cdot U_0$, (t_2) выходной сигнал СУ возвращается к исходному нулевому уровню.

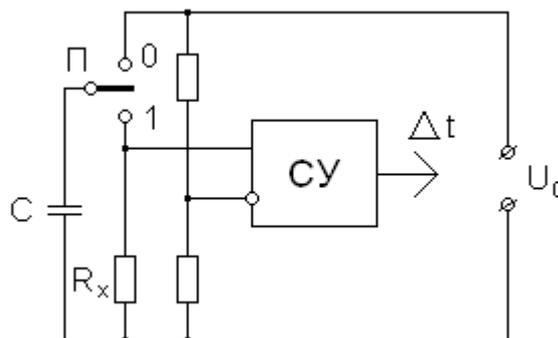
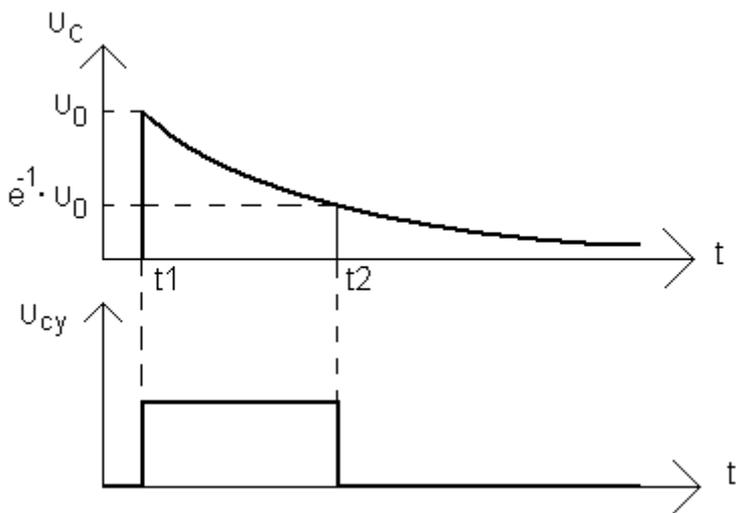


Рис.1

В результате на выходе СУ появится сигнал с длительностью, прямо пропорциональной величине измеряемого сопротивления.



Уравнение
преобразования:

$$U_c = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

$$e^{-1} \cdot U_0 = U_0 \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R \cdot C}}$$

$$R_x = \frac{1}{C} \cdot \Delta t$$

Преимущества:

- Выходной величиной является время
- Удобная для квантования величина;
- Достаточно высокая точность;
- Широкий диапазон измерения;
- Не требуются высокоомные образцовые резисторы;

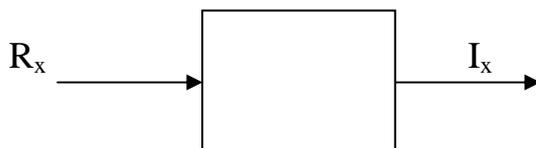
Недостатки:

- может быть использован только для измерений практически безреактивных сопротивлений;
- невозможность измерения сопротивлений, зависящих от напряжения (непроволочных резисторов, диэлектриков);
- громоздкость.

1.2 Методы преобразования сопротивления в ток

а) $R_x \rightarrow I_x$

Структурная схема:



Принцип работы:

Схема содержит источник образцового напряжения, в цепь которого включено измеряемое сопротивление. Напряжение, приложенное к измеряемому сопротивлению, вызывает в цепи ток I_x , обратно пропорциональный измеряемому сопротивлению.

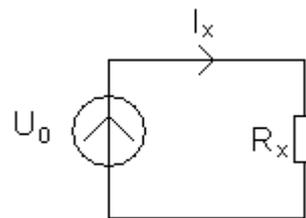


Рис.2.

Уравнение преобразования:

$$I_x = \frac{U_0}{R_x};$$
$$R_x = \frac{U_0}{I_x}$$

Преимущества:

- простота;
- высокая точность дальнейшего измерения тока;
- не требуется образцовый высокоомный резистор;

Недостатки:

- обратная зависимость тока в цепи от измеряемого сопротивления.

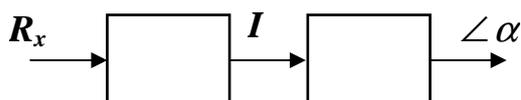
1.3 Косвенный метод определения сопротивления, путем преобразования в угол отклонения.

Этот метод можно разделить на две группы: с однорамочным измерительным механизмом и с двухрамочным механизмом логометрического типа.

Метод с однорамочным измерительным механизмом выполняется в зависимости от измеряемого сопротивления по последовательной или параллельной схеме.

Метод предназначен для более грубых измерений сопротивлений (с погрешностью более 1-1,5%), чем измерение с помощью мостов, потенциометров или цифровых приборов.

Используемые электромеханические приборы отградуированы в системе измеряемой величины. Измеряемая величина R_x преобразуется в угол отклонения прибора.



В схемах представленных на рисунках 3 и 4 использованы магнитоэлектрические измерительные механизмы, отградуированные в единицах измерения сопротивления. Угол поворота в механизме пропорционален току протекающему в рамке. Главным условием этого метода является $U = \text{const}$ только, тогда показания приборов будет соответствовать значению измеряемого сопротивления.

Для последовательной схемы включения R_x .

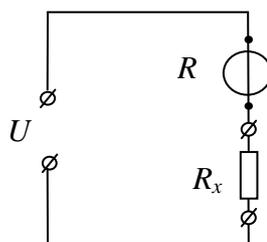


Рис.3

$$\text{Вращающий момент рамки } M = \frac{d\hat{O} \cdot I}{d\alpha}$$

$$\text{Магнитный поток } \hat{O} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \alpha,$$

где B – индукция в зазоре

ω – число витков катушки

S – площадь катушки

$$M = \frac{d\hat{O} \cdot I}{d\alpha} = B \cdot S \cdot \omega \cdot I \quad M_{\text{пр}} - \text{противодействующий момент}$$

$\dot{I}_{\text{ю}} = W \cdot \alpha$, где W – удельный противодействующий момент

$$\dot{I}_{\text{ю}} = \dot{I} \Rightarrow \alpha = \frac{B \cdot S \cdot \omega \cdot I}{W}; \quad I = \frac{U}{R_{\Sigma}}$$

При последовательном соединении $R_{\Sigma} = R + R_x$

$$\alpha = S \cdot U \cdot \frac{1}{R + R_x}$$

Метод измерения по последовательной схеме используют для измерения сравнительно больших сопротивлений (порядка килоомов), так как при малых значениях R_x эта схема имеет малую чувствительность.

Для параллельной схемы включения R_x .

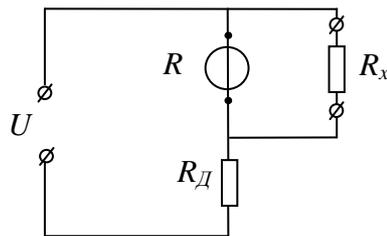


Рис.4

Ток в катушке МЭМ параллельной цепи равен

$$I = \frac{U \cdot R_{\text{пр.}}}{R_{\Sigma} \cdot R}, \quad \text{где } R_{\text{пр.}} = \frac{R \cdot R_x}{R + R_x},$$

$$R_{\Sigma} = R_d + R_{\text{пр.}} = \frac{R \cdot R_x + R_d \cdot (R + R_x)}{R + R_x} - \text{входное сопротивление}$$

омметра.

$$\alpha = SU \frac{R_x}{R \cdot R_x + R_d \cdot (R + R_x)}$$

$$S = \frac{Bs\omega}{W} - \text{чувствительность магнитоэлектрического измерительного механизма.}$$

Так как все значения величин в правой части уравнения постоянны, кроме R_x то угол отклонения определяется только значением R_x . Из выражений следует, что шкала прибора в обоих случаях не равномерна. В последовательной схеме в отличие от параллельной максимально значение сопротивления совмещен с нулевым показание шкалы прибора и поэтому такие омметры пригодны для измерения относительно больших сопротивлений, а в параллельной шкала имеет прямую зависимость показания прибора от измеряемого сопротивления, поэтому их использование более пригодно для малых сопротивлений.

Так как шкала рассмотренных омметров неравномерная, то класс точности их определяется по наибольшей абсолютной погрешности отклонения указателя Δl , отнесенной к длине L шкалы, соответствующей диапазону измерений (ГОСТ 8038—60). Такой способ определения класса точности дает возможность вычислить относительную погрешность измерения сопротивления γ_{Rx} через приведенную погрешность ИМ и его цепи $\gamma_{пр} = \Delta l/L$ из выражения:

$$\gamma_{Rx} = \gamma_{пр}/k(1-k)$$

где $k = \alpha/\alpha_n$, α — отклонение указателя; α_n — полный угол отклонения указателя омметра. Наименьшая погрешность омметра имеет место при $k = 0,5$ и равна четырехкратному значению погрешности ИМ.

Обычно омметры выполняют в виде переносных приборов классов точности 1,5 и 2,5. Основным недостатком этого метода является зависимость показаний от напряжений источника питания, в качестве которого используют сухую батарею. С течением времени ЭДС, которой уменьшается - это вызывает погрешность прибора. Поэтому появляется необходимость в предварительной регулировке прибора.

1.4 Методы преобразования сопротивления в напряжение

Структурная схема:



а) с использованием идеального генератора тока

Принцип работы: схема содержит источник образцового тока с очень большим входным сопротивлением, в цепь которого включается измеряемое сопротивление.

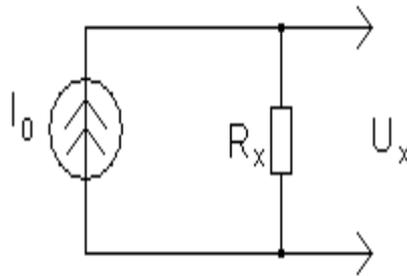


Рис 5.

Напряжение на резисторе прямо - пропорционально измеряемому сопротивлению.

Уравнение преобразования:

$$U_x = I_0 \cdot R_x;$$

$$R_x = \frac{U_x}{I_0}$$

Недостатки:

- Потребность в источнике тока с очень большим выходным током;
- Потребность в усилителе с очень большим сопротивлением при последующем преобразовании напряжения.

Преимущества:

- Большая чувствительность;

- Простота.

б) с использованием реального источника тока

структурная схема:

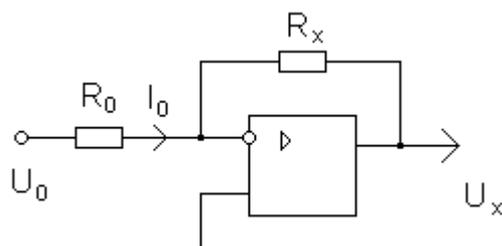


Рис.6.

Принцип работы:

Ток I_0 создается источником напряжения U_0 и равен U_0/R_0 , при входном сопротивлении усилителя много большем измеряемого он практически весь протекает через R_x , а напряжение на выходе усилителя будет пропорционально измеряемому сопротивлению.

Уравнение преобразования:

$$U_x = \frac{U_0}{R_0} \cdot R_x;$$

$$R_x = \frac{U_x}{U_0} \cdot R_0$$

Недостатки:

- Потребность усилителя с очень большим входным сопротивлением;
- Низкая чувствительность;

Преимущества:

- Прямая зависимость выходного напряжения от измеряемого сопротивления;

- Простота.

в) метод делителя(напряжение снимается с R_x)

Структурная схема:

Принцип работы:

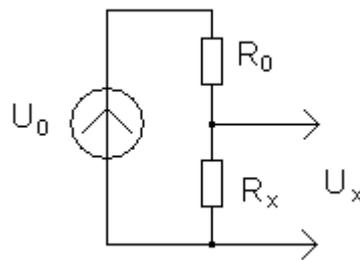


Рис.7.

На вход делителя, образованного измеряемым сопротивлением R_x и образцовым сопротивлением $R_0 \gg R_x$, подается стабилизированное постоянное напряжение U_0 ; с резистора R_x снимается напряжение пропорциональное измеряемому сопротивлению.

Уравнение преобразования:

$$U_x = U_0 \cdot \frac{R_x}{R_x + R_0};$$

$$U_x = \frac{U_0}{R_0} \cdot R_x;$$

$$R_x = \frac{U_x}{U_0} \cdot R_0$$

Преимущества:

- Простота;

Недостатки:

- Потребность в высокоомном сопротивлении большей величины чем измеряемое;
- Потребность в усилителе с очень большим входным сопротивлением
- При дальнейшем преобразовании напряжения

г) метод делителя(напряжение снимается с R0)

Структурная схема:

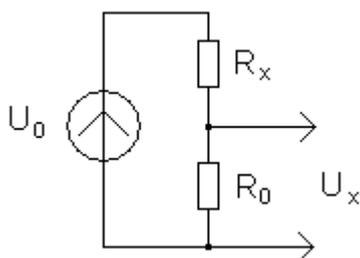


Рис.8

Принцип работы:

Аналогичен в) с тем различием, что напряжение, пропорциональное измеряемому сопротивлению, снимается с образцового сопротивления $R_0 \ll R_x$.

Уравнение преобразования:

$$U_x = U_0 \cdot \frac{R_0}{R_x + R_0};$$

$$U_x = \frac{U_0}{R_x} \cdot R_0$$

Преимущества:

- Нет потребности в высокоомном образцовом сопротивлении;
- Простота

Недостатки:

- Малая точность дальнейшего измерения напряжения;
- Обратная зависимость напряжения от измеряемого сопротивления.

2 Методы сравнения

2.1 Мостовой метод

Структурная схема:

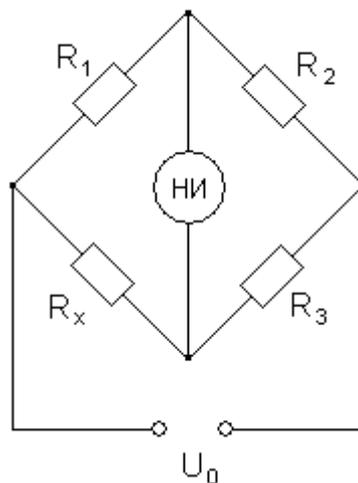


Рис.9.

Принцип работы:

Путем изменения соотношения R_1/R_2 и сопротивления R_3 добиваются равновесия, определяемого отсутствием тока в цепи нуль-индикатора. При этом результат измерения определяют по значениям R_1/R_2 и сопротивления R_3 .

Условие равновесия:

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3$$

Пределы измерения: 1 мкОм...100 Ом

Класс точности: 1...0,05

Преимущества:

- большая точность;
- высокая чувствительность;

Недостатки:

3. потребность в высокоомных образцовых мерах;
4. громоздкость.

2.2. Метод двойного моста.

Этот метод наиболее распространен для измерения малых сопротивлений.

В этой схеме влияние проводов и контактов сведено к минимуму.

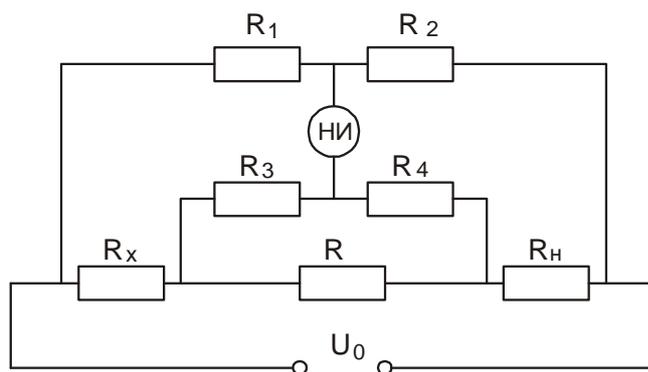


Рис.10.

Когда мост находится в равновесии, имеют силу следующие выражения.

$$I_1 = I_2; I_3 = I_4; I_X = I_H;$$

$$I_X R_X + I_3 R_3 = I_1 R_1$$

$$I_H R_H + I_4 R_4 = I_2 R_2$$

$$I_3 R_3 + I_4 R_4 = (I_1 + I_3) \cdot R$$

Из этих уравнений измеряемое сопротивление вычисляется по формуле:

$$R_X = R_H \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Предел измерения: 50 Ом...0,1 Мом

Класс точности: 0,05...0,5

2.3 Компенсационный метод

Структурная схема:

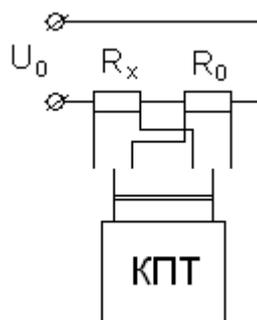


Рис.11

Принцип работы:

С помощью компенсатора постоянного тока последовательно измеряется напряжение на измеряемом сопротивлении U_x и на образцовом сопротивлении U_0 . Ток в цепи должен быть постоянным, он равен U_0/R_0 и равен U_x/R_x .

Уравнение преобразования:

$$\frac{U_0}{R_0} = \frac{U_x}{R_x};$$
$$R_x = \frac{U_x}{U_0} \cdot R_0$$

Преимущества:

- Высокая точность;
- Не высокие требования к источнику питания;

Недостатки:

- Сложность измерения;
- Потребность в компенсаторе постоянного тока с высоким входным сопротивлением.

5.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОММЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Пример 1

ЭЛЕКТРОННЫЙ ОММЕТР.

1. Исходные данные:

Омметр с пределом: 200кОм; погрешность прибора -1,0%.

Выбираем метод преобразования сопротивления в постоянное напряжение с использованием источника образцового напряжения и образцового резистора. Образцовое напряжение выбираем: $E_{\text{ПИТ}} = 100\text{В}$.

2. Выбираем МЭМ:

Магнитоэлектрический механизм М476

Внутреннее сопротивление $r_0 = 500 \text{ Ом}$

Ток полного отклонения $I_{\text{п}} = 100 \text{ мкА}$

Напряжение полного отклонения $U_{\text{п}} = 50 \text{ мВ}$

Класс точности механизма 0.5

3. Определяем напряжение полного отклонения.

$$U_n = I_n \cdot r_0 = 500 \cdot 10^{-4} = 50 \text{ мВ}$$

4. Определяем предел электронного вольтметра.

Исходя из методической погрешности $\gamma_m = \frac{R_x}{R_z} = 0,1\%$, рассчитаем величину

образцового сопротивления R_r . $R_r = 200 \text{ Мом}$. Источник образцового напряжения и R_r образуют источник стабильного тока, величиной

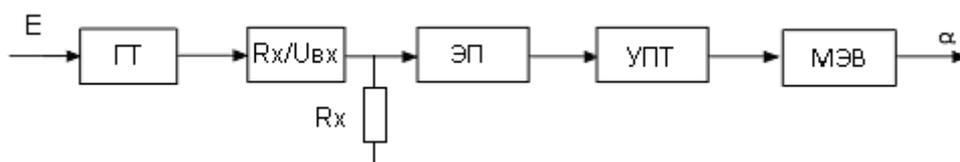
$$I_{\text{см}} = \frac{E}{R_z} = \frac{100}{200 \cdot 10^6} = 0,5 \text{ мА}$$

Тогда измеряемое сопротивление преобразуется в напряжение, определяющее предел вольтметра:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{см}} \cdot R_x = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 = 100 \text{ мВ}$$

Так как это напряжение соизмеримо с напряжением полного отклонения магнитоэлектрического механизма потребуется усилитель постоянного тока.

5. Структурная схема омметра:



$$\alpha = K_{R/U} \cdot K_{\text{эл}} \cdot K_{\text{упт}} \cdot K_{\text{мэв}} \cdot R_x$$

где:

ГТ - генератор постоянного тока

ЭП - Повторитель

УПТ- усилитель постоянного тока

МЭВ – Магнитоэлектрический вольтметр.

Генератор постоянного тока служит для преобразования сопротивления в напряжение.

Повторитель, обеспечивает заданное входное сопротивление электронного вольтметра постоянного тока и методическую погрешность вольтметра.

Усилитель постоянного тока усиливает сигнал до предела МЭВ.

Магнитоэлектрический вольтметр измеряет постоянное преобразованное напряжение с выхода измерительной схемы омметра.

6. Градуировка прибора.

На выходе 100 делений, на входе 200 кОм, тогда общий коэффициент преобразования определяется из уравнения преобразования

$$\alpha = k_{общ} * R_X$$

$$k_{общ} = \frac{100}{R_X} = \frac{100}{200000} = 0.0005 \text{ – деления – на Ом}$$

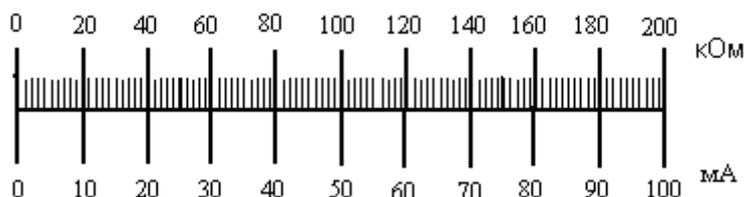


Рисунок. 2 Шкала омметра.

7. Разобьём $K_{общ}$ на составляющие:

$K_{R/U} = 0,0000005$ Вольт на Ом, $K_{ЭП} = 1$, $K_Y = 2$, $K_{МЭВ} = 500$ (делений на вольт).

8. Выбор и расчет элементов принципиальной схемы.

8.1. Первоначальные данные проекта.

$U_{ВХ} = 200 \text{ кОм}$. $\gamma = 1.0\%$, $E_{ПИТ} = 100 \text{ В}$

8.2. Схема повторителя.

$K_P = 1$

$R_{ВХ} = 1 \text{ Мом}$

В качестве ОУ возьмем ОУ К140УД17 Электрические параметры которого:

$K_Y = 150000$, $e_{см} = 0.25 \text{ мВ}$, $R_H = 2 \text{ кОм}$.

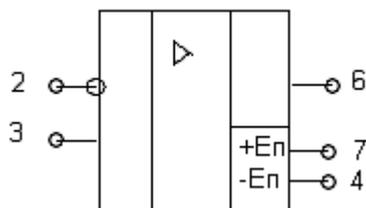


Рисунок 3. ОУ К140УД17.

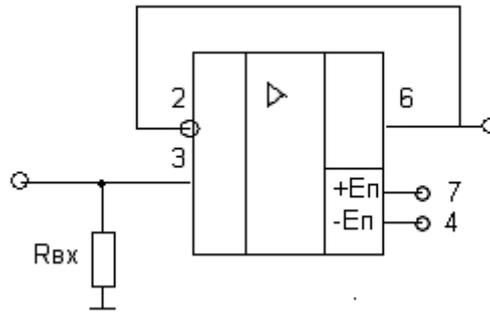


Рисунок. 4 Принципиальная схема повторителя.

8.3.Выбор и расчет усилителя напряжения

В качестве ОУ возьмем ОУ К140УД17 Электрические параметры которого описаны в пункте 8.2.

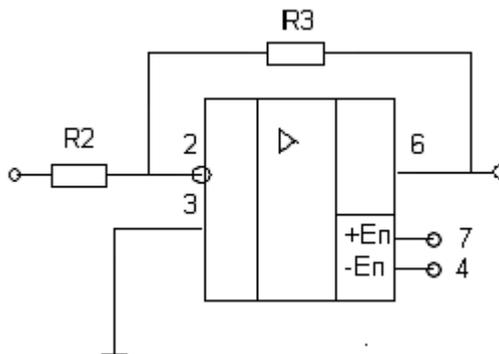


Рисунок. 5 Принципиальная схема усилителя.

Рассчитаем коэффициент усиления который должен быть не менее $K_u=2$.
Рассчитаем величины сопротивлений резисторов (R_2, R_3).

$$R_{BX} = R_5 = 1MOм$$

$$K_u = \frac{R_3}{R_2} = 2$$

Выбираем резисторы которые имеют погрешность не более 0.5% из E192-ряда

$$R_3=4.3 кОм .$$

8.4.Расчет магнитоэлектрического вольтметра

Принципиальная схема МЭВ представлена на (Рисунке 5) .

$$U_{BX}=200мВ$$

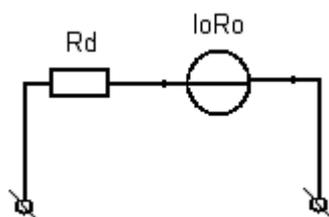


Рисунок 6. Магнитоэлектрический вольтметр

Магнитоэлектрический механизм М476

Внутреннее сопротивление $r_0 = 500 \text{ Ом}$

Ток полного отклонения $I_n = 100 \text{ мкА}$

Класс точности механизма 0.5

$$S_I = \frac{N}{I_n} = \frac{100}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^6$$

$$R_d = \frac{U_{ex}}{I_n} - r_0 = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{10^{-4}} - 500 = 1.5 \text{ кОм}$$

$R_d = 1500 \text{ Ом}$

$R_{МЭВ} = 2000 \text{ Ом}$

Выбираем резисторы которые имеют погрешность не более 0.5% из E192-ряда типоминал С2-29В.

9. Принципиальная схема прибора:

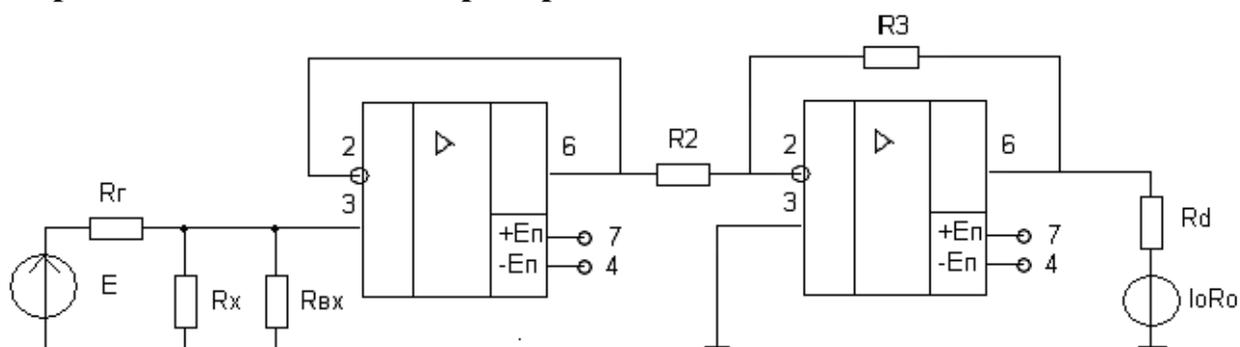


Рисунок. 3 Принципиальная схема вольтметра постоянного тока.

9. Установим класс точности прибора.

$$\alpha = K_{U/I} \cdot K_{R/U} \cdot K_{эн} \cdot K_{ynn} \cdot K_{мэв} \cdot U_X$$

$$\alpha = \frac{R3}{R2} \cdot \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot U_X$$

$$dK = \frac{dR_3 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3} - \frac{dR_2 \cdot R_4}{R_2^2} + \frac{dS_I \cdot S_I}{(R_d + r_0) \cdot S_I} - \frac{S_I \cdot dR_d \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2 \cdot R_d} - \frac{S_I \cdot dr_0 \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2 \cdot r_0}$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{R_3}{R_2} \gamma_{R2} - \frac{R_3}{R_2} \cdot \gamma_{R3} + \frac{S_I}{(R_d + r_0)} \cdot \gamma_{MЭМ} - \frac{S_I \cdot R_d}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{R3} - \frac{S_I \cdot r_0}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_{MЭВ}^2 + \frac{R_d^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{Rd}^2 + \frac{r_0^2}{(R_d + r_0)^2} \cdot \gamma_{r0}^2 + \gamma_{R3}^2 + \gamma_{R2}^2} = \sqrt{0.48 + 0.49} = 0.98$$

Выбираем из ряда класс точности прибора 1.0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов В.О. Электрические измерительные приборы и измерения. – М.: Энергоатомиздат., 1958. – 631 с.
2. Атамян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учебное пособие для студ. вузов. – М.: Высш. Шк., 1989. – 384с.
3. Гутников В.С. Применение ОУ в измерительных устройствах. - Л.: Энергия, 1975–120 с.
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат., 1988. – 304 с.
5. Евтихийев Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 357 с.
6. Илюкович А.М. Измерение больших сопротивлений. М.: «Энергия», 1971-128с.
7. Рождественская Т.Б. Аппаратура для измерения больших сопротивлений, малых постоянных токов, и методы её поверки. М.: Издательство стандартов, 1973-146с.
8. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник./Под ред. Акимова Н. Н. – Минск: «Беларусь», 1994– 591с.
9. Электрические измерения: Учебник для вузов; Под редакцией А.В.Фремке и Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

- 10 . Полулях К.С. Электронные измерительные приборы – М.: Высш. шк., 1966. – 400с.
11. Резисторы, трансформаторы: Справочник. / Под ред. И.И. Четвертак. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник./Под ред. Акимова Н. Н. – Минск: «Беларусь», 1994– 591с.
13. Справочник по электроизмерительным приборам / Под ред. К. К. Илюнина – Ленинград: «Энергоатомиздат», 1983 - 784с.
14. Полупроводниковые приборы, диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник / Под ред. А.В.Голомедова – Москва: «КУБК-а», 1996 -528с.
15. Векслер Н.С., Теплинский А.Н. Шунты переменного тока. –Л.: Энергоатомиздат., 1987. – 120 с.
16. Новиков Ю.В. Основы цифровой схемотехники, базовые элементы и схемы, методы проектирования. - М: «МИР», 2001 - 379