



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Физика»

П. А. Хило, А. И. Кравченко, С. В. Пискунов

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу «Физика»
для студентов всех специальностей
дневной формы обучения**

**Часть 2
Электричество и магнетизм**

Гомель 2012

УДК 537.08+621.317(075.8)
ББК 22.33+34.9я73
Х45

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 7 от 27.03.2012 г.)*

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доц. каф. «Высшая математика» ГГТУ им. П. О. Сухого
В. И. Лашкевич

Хило, П. А.
Х45 Изучение основных характеристик электроизмерительных приборов : лаборатор. практикум по курсу «Физика» для студентов всех специальностей днев. формы обучения. Ч. 2. Электричество и магнетизм / П. А. Хило, А. И. Кравченко, С. В. Пискунов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 35 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://alis.gstu.by/StartEK/>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены краткие сведения об основных типах электроизмерительных приборов, в том числе и осциллографа, их устройстве и принципе действия. Описывается методика измерений и порядок выполнения лабораторной работы.

Для студентов дневной формы обучения.

УДК 537.08+621.317(075.8)
ББК 22.33+34.9я73

© Хило П. А., Кравченко А. И.,
Пискунов С. В., 2012
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

Предисловие

Лабораторный практикум охватывает вопросы, которые входят в программу обучения студентов инженерно-технических специальностей вузов по разделу «Электричество и магнетизм» курса физики.

Цель практикума – научить студентов самостоятельно анализировать физические явления и законы, положенные в основу выполняемой лабораторной работы.

В практикуме описаны устройство и принцип действия основных видов электроизмерительных приборов, в том числе и осциллографа.

Методическое указание ставит целью ознакомить студентов с устройством и принципом широкого спектра электроизмерительных приборов и оказать помощь при выполнении практических упражнений с электроизмерительными приборами.

Перед выполнением практической части практикума (лабораторной работы № 2–1) студент обязан разобраться в том, какое явление будет изучать, и что будет измерять. Для этого он должен изучить, помимо материала, изложенного в данном практикуме, соответствующий раздел учебника и конспект лекций. Студент должен быть готов дать ответ по теоретическим вопросам, касающимся выполняемой работы, и по методике выполнения работы.

При оформлении отчета необходимо соблюдать следующие правила:

1. Титульный лист должен быть оформлен согласно образцу 1 (на стенде в лабораториях 503, 504).

2. В отчете указать цель работы, приборы и принадлежности с их характеристиками. Для электроизмерительных приборов указать систему прибора, класс точности, предел измерения.

3. Порядок выполнения работы должен содержать:

а) электрическую схему (если собирали две схемы, то обе надо начертить);

б) таблицы с данными опытов;

в) расчетные формулы;

г) расчет погрешности;

д) графики, выполненные на миллиметровой бумаге и от руки;

е) выводы с ответами на вопросы, указанные в конце каждой работы.

Лабораторная работа № 2–1

Изучение основных характеристик электроизмерительных приборов

Цель работы:

1. Изучить устройство и принцип действия приборов разных систем, их погрешности, достоинства, недостатки и область применения.
2. По шкале конкретного прибора определить его основные характеристики и абсолютную погрешность намерения.
3. Рассчитать шунт и дополнительное сопротивление для расширения пределов измерения прибора.
4. Изучить принцип действия и назначение основных узлов электронного осциллографа.
5. Изучить порядок проведения измерений с помощью осциллографа.

Приборы и принадлежности: приборы разных систем или набор шкал от различных приборов, электронный осциллограф, звуковой генератор, соединительные кабели, проводники.

Теоретическая часть

Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительным прибором называется устройство, которое предназначено для измерения различных электрических величин: тока, напряжения, сопротивления, электрической мощности и т. д.

Все измерительные приборы делятся на две большие группы: аналоговые (АИП) и цифровые (ЦИП).

Аналоговые измерительные приборы – приборы, показания которых являются непрерывной функцией изменения входной измеряемой величины.

К приборам для статических измерений относятся вольтметры, амперметры, омметры и другие.

К приборам для динамических измерений относятся электронно-лучевые осциллографы, самопишущие приборы.

Все аналоговые электроизмерительные приборы, предназначенные для статических измерений – электромеханические и электронные и классифицируются по следующим признакам:

1. По роду измеряемой величины: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики электрической энергии, термометры и т. д.

2. По роду тока: приборы переменного тока, приборы постоянного тока, постоянного и переменного тока.

3. По принципу действия: в зависимости от того, какие физические законы заложены в принцип работы электроизмерительных приборов. Они подразделяются на системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, цифровую, тепловую, вибрационную, электростатическую и т. п.

4. По степени точности: от 1 до 8 класса. С увеличением номера класса увеличивается значение относительной погрешности прибора. Класс точности прибора определяется по табл. 1. Он соответствует единственному числу на шкале прибора, записанному в виде десятичной дроби. Например, если на шкале нанесена надпись 1,0, это означает, что относительная погрешность прибора составляет 1 %, и он соответствует 5-му классу точности.

Таблица 1

Классы точности электроизмерительных приборов

Число на шкале прибора (его относительная погрешность, %)	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0
Класс точности	1	2	3	4	5	6	7	8

Помимо выше перечисленных признаков, приборы различаются по условиям эксплуатации, защищенности от внешних электромагнитных полей, устойчивости к механическим воздействиям.

В зависимости от условий эксплуатации приборы разделяют на три группы:

Группа А – для работы в сухих, отапливаемых помещениях.

Группа Б – для работы в закрытых, неотапливаемых помещениях.

Группа В – для работы в полевых (B_1) или морских (B_2) условиях.

По устойчивости к механическим воздействиям приборы делятся на обыкновенные, обыкновенные с повышенной прочностью и устойчивые к механическим воздействиям: тряскопрочные (ТП), вибропрочные (ВП) и т. п.

Установлена специальная система маркировки приборов. Согласно этому, на шкале прибора при помощи условных обозначений указаны: единица измеряемой величины; класс точности прибора;

ГОСТ, по которому он изготовлен; род тока и число фаз; система прибора; категория защищенности прибора; испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей относительно корпуса прибора; год выпуска и заводской номер прибора. Для каждой системы характерны свои достоинства и свои недостатки.

Класс точности характеризует свойства приборов в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих приборов.

Чувствительность прибора S – это отношение линейного или углового перемещения указателя к изменению измеряемой величины, вызвавшему это перемещение $S = \frac{d\alpha}{dx}$.

У измерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная.

Чувствительность прибора не следует смешивать с порогом чувствительности, под которым понимают наименьшее изменение входного сигнала, способное вызвать заметное изменение показания прибора.

Цена деления шкалы C – это разность между верхним и нижним пределами измерения деленная на число делений между ними. Цена деления может быть определена как величина обратная чувствительности $C = \frac{1}{S}$.

Чтобы снять показание прибора, надо цену деления шкалы умножить на число делений, до которого дошел указатель.

Важной характеристикой является надежность средства измерения – это способность прибора сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени.

Ниже описываются некоторые, чаще других применяемые, системы.

Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы работают на основе силового действия магнитного поля на ток, протекающий по проводнику, изготовленному в виде рамки. Как правило, магнитное поле образуется постоянным магнитом, а легкая рамка может свободно вращаться в зазоре между полюсами магнита. В результате действия сил создается вращающий момент сил, а слишком большому повороту рамки противодействует спиральная пружина, противодействующий момент упру-

гих сил у которой пропорционален углу поворота. Поэтому шкала у приборов этой системы равномерная, они не потребляют большого количества электроэнергии, обладают высокой чувствительностью и точностью. Но, с другой стороны, приборы магнитоэлектрической системы очень боятся механических перегрузок, равно как и электрических, из-за которых перегорают тонкие токопроводящие пружинки. Этими приборами нельзя измерить переменный ток, т. к. направление отклонения стрелки зависит от направления тока в рамке.

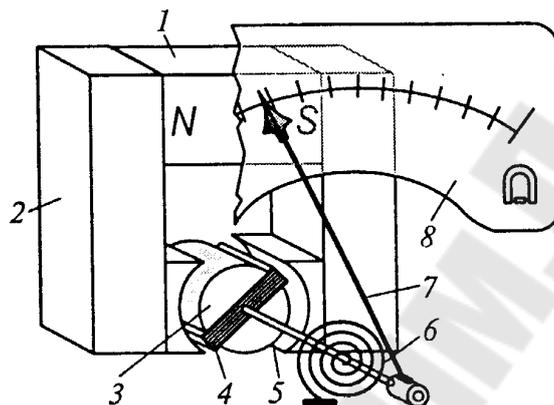


Рис. 1. Конструкция магнитоэлектрического механизма:
 1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – цилиндрический сердечник из магнитомягкого материала; 4 – рамка с измеряемым током; 5 – ось; 6 – спиральная пружина; 7 – стрелка; 8 – шкала

В данной системе (рис. 1) измерительный механизм состоит из проволочной рамки с протекающим в ней током, помещенной в поле постоянного магнита (магнитопровода). Поле в зазоре, где находится рамка, однородное. Под действием протекающего тока I рамка вращается в магнитном поле. Угол отклонения стрелки ограничивается спиральной пружиной, равной

$$\alpha = I \frac{\Psi}{w},$$

где $\Psi = BSN$ – удельное потокосцепление; w – удельный противодействующий момент пружины.

Приборы электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы работают, как правило, в цепях переменного тока. Принцип действия этих приборов основан на действии магнитного поля тока, протекающего по неподвижной катушке, на ферромагнитный сердечник, способный втягиваться в об-

ласть большего поля. Поскольку по подвижной части прибора сок не протекает, то такие приборы прекрасно выдерживают электрические и механические перегрузки. Направление отклонения стрелки не зависит от направления тока в катушке, что позволяет использовать эти приборы в цепях и постоянного и переменного тока. К недостаткам приборов электромагнитной системы относятся: неравномерная шкала, невозможность измерений при малых токах (вблизи нуля шкалы нет вовсе) из-за большого собственного потребления электрической энергии, низкая точность и чувствительность.

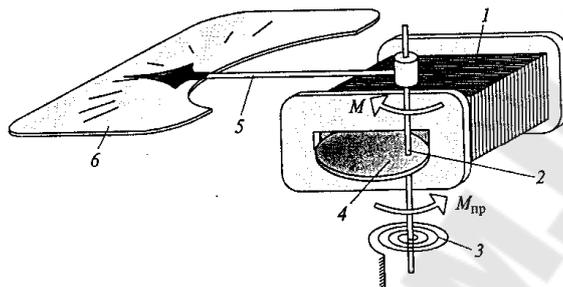


Рис. 2. Устройство электромагнитного механизма:

1 – катушка с измеряемым током; 2 – ось; 3 – спиральная пружина; 4 – сердечник из магнитомягкого материала; 5 – стрелка; 6 – шкала

Принцип действия этой системы (рис. 2) основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Протекающий по катушке ток I создает магнитный поток, который втягивает сердечник. Спиральная пружина связана со стрелкой, угол поворота которой равен

$$\alpha = \frac{I^2}{2w} \frac{dL}{d\alpha},$$

где L – индуктивность катушки; w – удельный противодействующий момент пружины.

Приборы электродинамической системы

Принцип действия этих приборов основан на действии магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, на ток, протекающий по проводнику подвижной (вращающейся) катушки. При включении такого прибора в измерительную цепь с переменным током, одновременно изменяются направления магнитного поля и тока во вращающейся катушке, поэтому направление момента сил не меняется, т. е. приборы можно с успехом применять в цепях переменного тока. Сходство с приборами магнитоэлектрической системы (наличие подвижной рамки с током) приводит к тому, что чувствительность у при-

боров этой системы хорошая, но шкала, как и у приборов электромагнитной системы неравномерна. Такие приборы не способны выдерживать механические и электрические перегрузки.

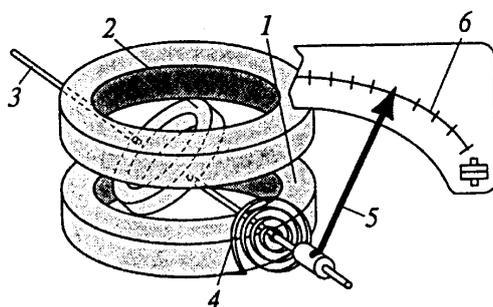


Рис. 3. Конструкция электродинамической системы:
 1 – неподвижная катушка; 2 – подвижная катушка; 3 – ось;
 4 – спиральная пружина; 5 – стрелка; 6 – шкала

Принцип действия системы (рис. 3) основан на взаимодействии магнитных потоков двух катушек с током I_1 и I_2 . Протекающие по катушкам токи создают магнитные потоки, которые стремятся принять одно направление. При этом подвижная катушка поворачивается внутри неподвижной. Спиральная пружина, закрепленная на оси, связана со стрелкой, угол поворота которой равен

$$\alpha = \frac{I_1 I_2 \cos \varphi}{w} \frac{dM}{d\alpha},$$

где φ – угол сдвига фаз между токами; M – коэффициент взаимной индуктивности катушек.

Разновидностью электродинамической системы является ферродинамическая система, у которой магнитные потоки катушек замыкаются не по воздуху, а по вспомогательным магнитопроводам.

Приборы электростатической системы

Принцип действия приборов электростатической системы (рис. 4) основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Подвижная алюминиевая пластина закреплена вместе с указателем, перемещается, взаимодействуя с неподвижной пластиной. Угол поворота стрелки равен

$$\alpha = \frac{U^2}{w} \frac{dC}{d\alpha},$$

где U – напряжение на пластинах; C – электрическая емкость.

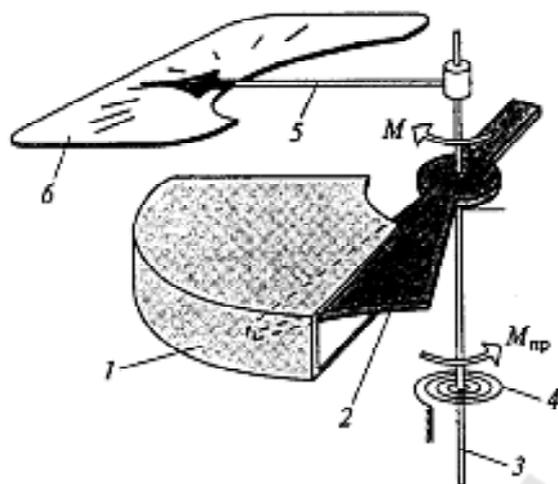


Рис. 4. Устройство электростатического механизма:
 1 – неподвижная пластина; 2 – подвижная пластина; 3 – ось; 4 – спиральная пружина; 5 – стрелка; 6 – шкала

Аналоговые приборы других систем

Приборы тепловой системы действуют по принципу изменения длины или сопротивления, они могут работать в цепях как переменного, так и постоянного тока.

Приборы индукционной системы работают по принципу действия магнитного поля неподвижного магнита на индуцируемый в подвижной части прибора ток.

Приборы с вибрационной системой используют явление резонанса при совпадении частот собственных механических колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока. Применялись такие приборы для измерений частоты переменного тока (сейчас не применяются).

Назначение и порядок использования некоторых электроизмерительных приборов

На каждый прибор (шкалу) наносят условные обозначения. Они обозначают: единицу измеряемой величины; класс точности; род тока; товарный знак предприятия – изготовителя, дату выпуска; испытательное напряжение изоляции; систему прибора и другие обозначения (рис. 5).

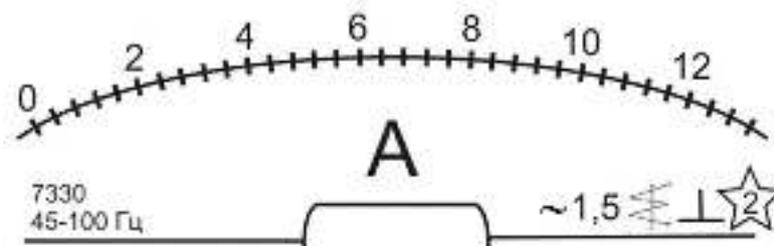


Рис. 5. Шкала прибора

Рассмотрим пример описания прибора, шкала которого изображена на рис. 5: амперметр для работы в цепях переменного тока; электромагнитной системы типа 7330; предельное значение измеряемой величины – 12 А; соответствует 6-му классу точности (относительная погрешность составляет 1,5 %); рабочее положение – вертикальное; измерительная цепь прибора изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ.

$$\text{Цена деления прибора } C = \frac{4 - 2}{5} = 0,4 \text{ А/дел.}$$

$$\text{Чувствительность прибора } S = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ дел/А.}$$

Показание прибора: необходимо цену деления C умножить на число делений n , на которые отклонился указатель (стрелка) прибора:

$$X = Cn.$$

Расчет погрешности измерений

Допустим, имеем ряд замеров x_1, x_2, \dots, x_n , полученных одним прибором при измерении одной и той же величины x .

Тогда результатом измерения, следует считать среднее арифметическое всех замеров:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Ошибка результата одного измерения, обусловленная неточностью отсчета, представляет собой абсолютную ошибку отсчета $\Delta x_{\text{отсч}}$, и численно равна половине цены одного деления шкалы прибора:

$$\Delta x_{\text{отсч}} = 0,5C.$$

Точность результата измерения зависит от погрешности, обусловленной неточностью отсчета, и от погрешности, обусловленной неточностью прибора. Абсолютная ошибка результата измерения Δx

есть сумма абсолютной погрешности отсчета $\Delta x_{\text{отсч}}$ и абсолютной погрешности прибора $\Delta x_{\text{приб}}$:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{отсч}} + \Delta x_{\text{приб}}.$$

Абсолютную погрешность прибора $\Delta x_{\text{приб}}$ можно найти, зная класс точности этого прибора k :

$$\Delta x_{\text{приб}} = \frac{kx_{\text{max}}}{100 \%},$$

где x_{max} – максимальное (амплитудное) значение измеряемой величины.

Относительная погрешность результата измерений

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100 \%.$$

Тогда окончательный результат измерения выглядит так:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x; \quad \varepsilon_x = \dots \%$$

Поскольку по мере увеличения значения измеряемой величины относительная ошибка измерения значительно уменьшается, то при измерениях нужно выбирать такие пределы измерений, чтобы значение измеряемой величины находилось во второй половине шкалы прибора.

Расширение пределов измерения электрических приборов

Для измерения малых токов (до 100 мА) используются магнитоэлектрические амперметры, которые в электрическую цепь включаются последовательно. Амперметры должны иметь малое сопротивление, чтобы включение их не изменяло величины тока в цепи. Для расширения пределов измерения амперметров применяются шунты (точные резисторы с малым сопротивлением), которые подсоединяются в цепь параллельно амперметру (рис. 6).

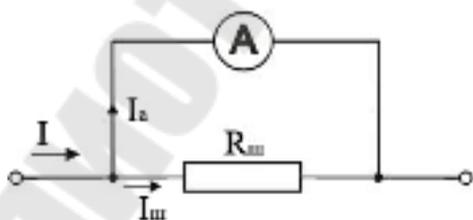


Рис. 6

Тогда по закону Кирхгофа $I = I_a + I_{\text{ш}}$.

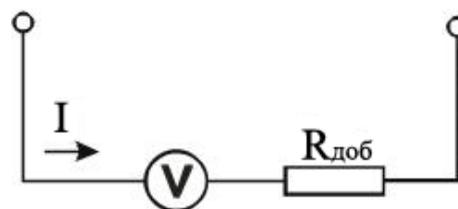


Рис. 7

Для параллельного соединения $U = \text{const}$, т. е. $I_a R_a = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}$.

$$R_{\text{ш}} = \frac{I_a R_a}{I_{\text{ш}}} = \frac{I_a R_a}{I - I_a} \text{ или } R_{\text{ш}} = \frac{R_a}{n - 1}, \text{ где } n = \frac{I}{I_a}.$$

Для расширения пределов измерения магнитоэлектрического вольтметра, который в электрическую цепь включается параллельно, последовательно к нему подключается добавочное сопротивление (рис. 7).

Применив закон Ома для участка цепи, получим:

$$U = I(R_{\text{доб}} + R_V) = IR_{\text{доб}} + IR_V;$$

$$R_{\text{доб}} = \frac{U}{I} - R_V = R_V \left(\frac{U}{IR_V} - 1 \right) = R_V \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right) = R_V (n - 1).$$

Цифровые измерительные приборы

В практике электрических измерений во всем мире используются цифровые измерительные приборы (ЦИП), которые по всем показателям превосходят аналоговые измерительные приборы. У них гораздо более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, но стоимость выше, чем у аналоговых приборов.

Блок-схема универсального цифрового прибора показана на (рис. 8).

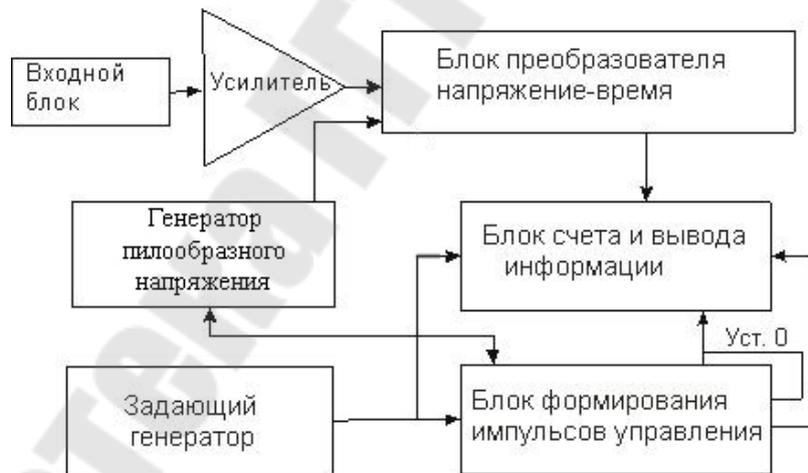


Рис. 8

Входной блок служит для ослабления слишком сильных сигналов в 1000, 100 или 10 раз, если это необходимо. В этом блоке все измеряемые параметры (ток, напряжение, сопротивление, температура и т. д.) при помощи соответствующих датчиков преобразуются в постоянное напряжение, пропорциональное измеряемому параметру. Это напряжение усиливается до значения, находящегося в интервале от 0 до 10 В,

и поступает на один вход пороговой схемы сравнения (блок преобразования напряжения – время). На второй вход схемы сравнения подается периодическое, линейно нарастающее (пилообразное) напряжение (рис. 9, а).

На выходе первой схемы сравнения получаем пакеты импульсов напряжения (рис. 9, б), которые затем подаются на один из входов второй схемы сравнения, а на второй вход подается импульсный сигнал с частотой 100 кГц или 1 МГц от кварцевого генератора, обеспечивающего высокую точность и стабильность частоты (рис. 9, в).

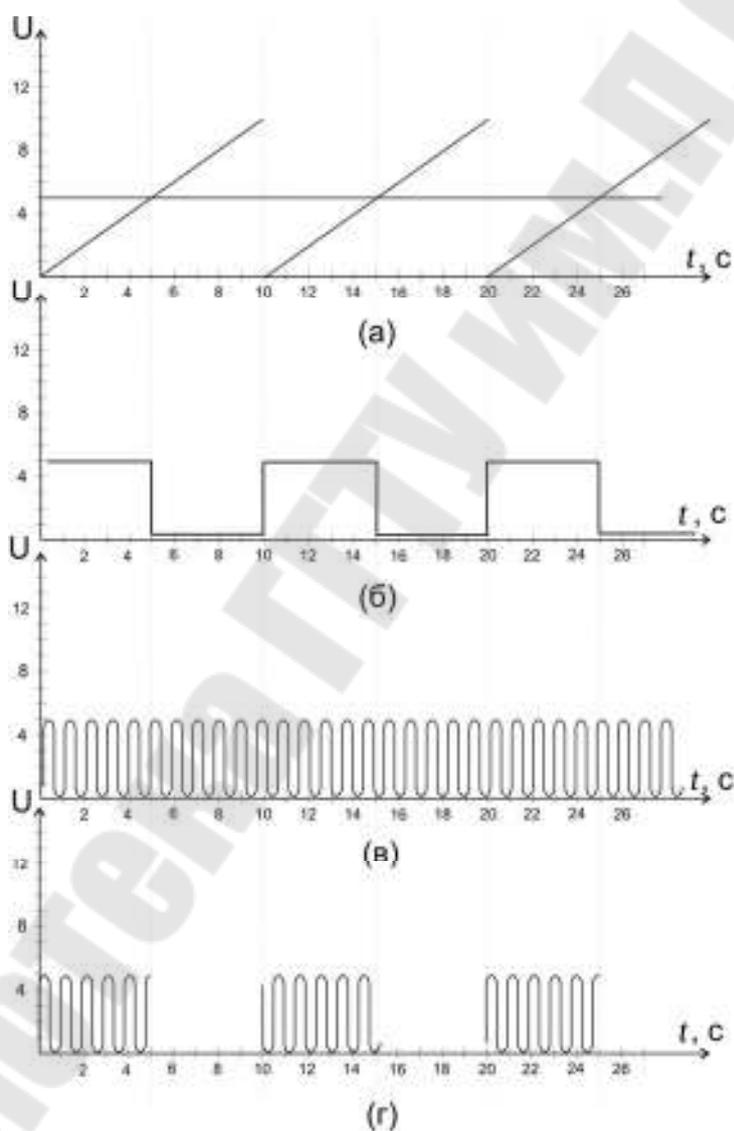


Рис. 9

На выходе второй схемы сравнения присутствует напряжение только тогда, когда оно есть одновременно на двух входах. Поэтому, на выходе второй схемы сравнения присутствуют импульсы напряжения стандартной частоты только в пределах каждого пакета, при-

чем их количество пропорционально длительности пакета, а значит, и измеряемому напряжению (рис. 9, з). Цифровое отсчетное устройство регистрирует измеряемую величину и высвечивает полученное число на индикаторах. Таким образом, входное устройство, аналого-цифровой преобразователь и цифровое отсчетное устройство вместе образуют структурную схему универсального цифрового прибора.

Электронный осциллограф. Устройство и принцип действия

Электронный осциллограф (ЭО) – прибор, предназначенный для изучения разнообразных переменных электрических процессов. Помимо качественной оценки исследуемых процессов осциллографы дают возможность оценить ряд величин (напряжение сигнала, фазу, частоту и др.) количественно.

Достоинствами электронного осциллографа являются его высокая чувствительность, малая инерционность и большое входное сопротивление. Последнее достоинство исключает влияние прибора на режим работы цепей, к которым он подключается. Работает осциллограф, как правило, от переменного тока (220 В).

ЭО состоит из следующих узлов и блоков (рис. 10): электронно-лучевой трубки (ЭЛТ); блока питания; усилителей сигналов каналов *X* и *Y* и аттенюатора (делителя напряжения); генератора развертки (пилообразного напряжения); блока синхронизации; калибратора.



Рис. 10. Функциональная схема ЭО

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) – основная часть прибора, на экране которой наблюдается исследуемый сигнал (рис. 11).

ЭЛТ представляет собой вакуумную колбу 10 , внутри которой впаяны электроды различного назначения. Одна группа электродов образует так называемую электронную пушку, создающую электронный луч, направленный вдоль оси ЭЛТ. К ним относятся:

– катод 2 , нагреваемый с помощью нити накала 1 . Эмиссия электронов происходит с торцевой поверхности катода, покрытого слоем окисла с малой работой выхода электронов;

– управляющий электрод (модулятор) 3 , на который подается отрицательный относительно катода потенциал. Величина этого потенциала с помощью потенциометра R_1 может изменяться, что приводит к изменению яркости пятна на экране 8 (чем меньше по абсолютной величине потенциал, тем больше пройдет через модулятор в единицу времени электронов и тем ярче будет пятно);

– первый анод 4 , выполненный в виде цилиндра, внутри которого расположено несколько диафрагм с отверстиями в центре;

– второй анод 5 – более короткий цилиндр с отверстием в центре.

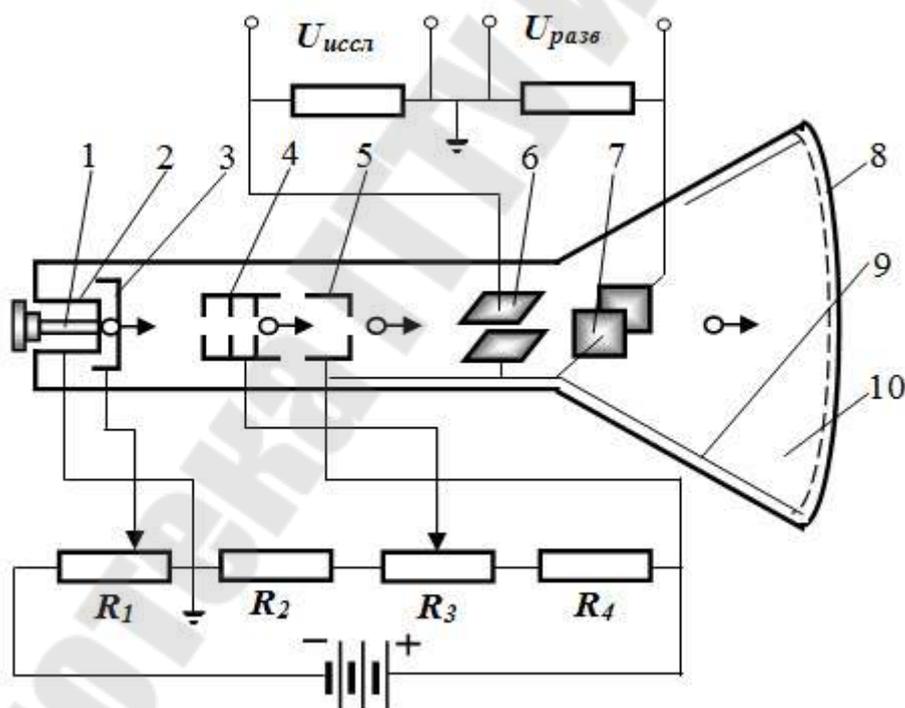


Рис. 11. Электронно-лучевая трубка

На оба анода подаются положительные относительно катода потенциалы (на анод $4 \approx 500$ В, на анод $5 \approx 3000$ В), а потому они являются ускоряющими элементами (сообщают электронам ускорение и большую скорость). Кроме того, они совместно с модулятором 3

формируют здесь электрическое поле. Результирующее электрическое поле электродов 3, 4 и 5 оказывается таким, что электроны, двигаясь вдоль силовых линий, фокусируются на экране. Регулировка фокусирующего действия осуществляется потенциометром R_3 .

К другой группе электродов относятся:

- вертикально отклоняющие пластины 6. Именно на них подается, как правило, после усиления исследуемое напряжение;
- горизонтально отклоняющие пластины 7. На них обычно подается напряжение с генератора развертки (см. ниже);
- третий анод 9, соединенный с электродом 5 и играющий вспомогательную роль.

Блок питания обеспечивает питающими напряжениями схему осциллографа. В него входят: выпрямители, трансформаторы, стабилизатор и некоторые другие элементы.

Блоки усилителей и аттенюатор. Чувствительность непосредственно ЭЛТ (но не осциллографа) не велика (≈ 2 мм/В), поэтому подаваемые сигналы (особенно вертикальный – Y) часто должны быть предварительно усилены. Это и делается с помощью усилителей Y и X (рис. 10). В случае большой амплитуды исследуемого сигнала его необходимо ослабить. Для этого на входе усилителя Y (ручка «Усиление») ставят делитель напряжения – аттенюатор (ручка «Вольт/дел»).

В усилителе X аттенюатор отсутствует, поэтому подавать на горизонтально отклоняющие пластины большие (> 25 В) напряжения нельзя. Однако коэффициент усиления X усилителя может быть увеличен в 5 раз (тумблер из положения « $\times 1$ » перевести в положение « $\times 0,2$ »).

При помощи потенциометров, входящих в усилители X и Y , производится управление положением луча по горизонтали (ручки «Плавно» и «Грубо») и по вертикали (ручка \updownarrow).

Генератор развертки. Для получения на экране ЭЛТ осциллограмм (графика зависимости напряжения исследуемого сигнала от времени) необходимо на вход X осциллографа (а с него на горизонтально отклоняющие пластины) подать напряжение, пропорциональное времени, т. е. напряжение развертки U_x . Создается это напряжение генератором (непрерывной) развертки, на выходе которого ставится усилитель.

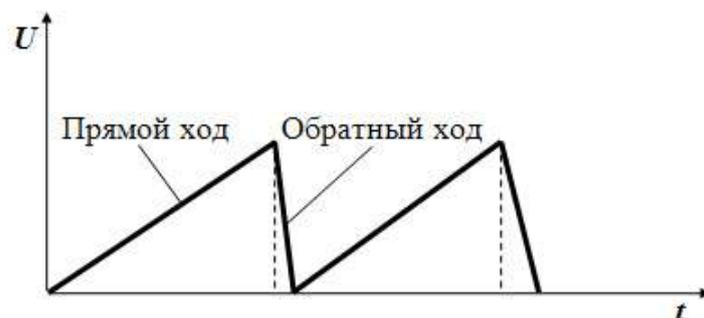


Рис. 12

Напряжение развертки имеет пилообразный вид (рис. 12) и может регулироваться по амплитуде и частоте. На участке прямого хода, где $U_x \sim t$, электронный луч смещается по экрану трубки слева направо. За время обратного хода луч быстро возвращается в крайнее левое положение. Для некоторых специальных целей генератор развертки можно ввести в режим так называемой ждущей развертки (о принципе действия генераторов развертки можно прочесть в специальной литературе). При непрерывной развертке ручка «Стаб» должна стоять в положении, когда при отсутствии сигнала, на экране появляется линия развертки (горизонтальная линия).

Блок синхронизации. Для наблюдения периодических быстропротекающих процессов важно получить на экране ЭО неподвижное изображение сигнала. Для этого нужно, чтобы период развертки был кратен периоду изучаемого сигнала. Обеспечить заранее это условие трудно. Поэтому используют принудительное согласование периодов – синхронизацию. Эту функцию в ЭО и выполняет блок синхронизации. Синхронизация может быть внутренней (ручка «Внутр») и внешней (ручка «Внешн»). Внешняя синхронизация осуществляется от внешнего источника, сигнал которого может быть ослаблен в 10 раз (1:1; 1:10). Кроме того, предусмотрено изменение полярности синхронизации (+, –) – сигнал синхронизации совпадает или противоположен по полярности входному сигналу. Возможен и плавный переход от «+» к «–» (ручка «Уровень»), когда добиваются устойчивого положения сигнала. Блок синхронизации осуществляет также выбор типа входа (открытый вход – проходят и постоянная, и переменная составляющие; закрытый вход – проходит только переменный сигнал), а также отключение генератора развертки (ручка переключается в положение «X»).

Калибратор. Чтобы измерить величину сигнала и его длительность, нужно сравнить этот сигнал с другим известным по величине и длительности сигналом. Иначе говоря, нужно знать цену деления сет-

ки экрана по вертикали и горизонтали (прокалибровать сетку). Делается это с помощью специального генератора-калибратора, который создает П-образные сигналы частотой 2 кГц и амплитудой 6 В. Калибровка производится, как правило, в заводских условиях, однако при эксплуатации ЭО приходится ее проверять и уточнять.

По вертикали калибровку уточняют при помощи шлица «Чувст», расположенного с левой стороны прибора, а по горизонтали – с помощью шлица «Калибровка длительности», расположенного с правой стороны прибора.

Пользоваться указателями цены деления ручек «Вольт/дел» и «Время/дел» можно только при условии уверенности и правильности калибровки.

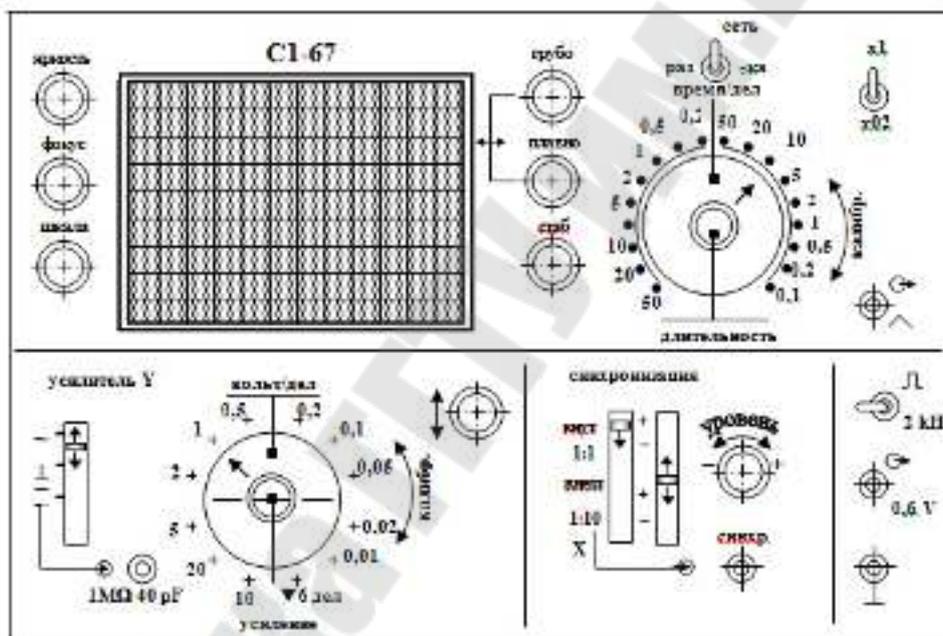


Рис. 13

На рис. 13 изображена панель осциллографа С1-67. Здесь же указаны названия ручек управления, по которым (названиям) можно судить об их назначении.

Измерения с помощью осциллографа

Электронные осциллографы широко применяются в качестве индикаторов при различных измерениях методом сравнения, а также для измерения напряжения, тока, частоты, сдвига фаз и т. п.

Измерение сопротивления и напряжения. Для измерения неизвестного сопротивления R_x последовательно с ним включается эталонное сопротивление $R_{эт.}$ для измерения тока, а неизвестное сопротивление определяют по закону Ома (рис. 14).

Напряжение с эталонного сопротивления подается на пластины Y , а с измеряемого сопротивления R_x – на пластины X .

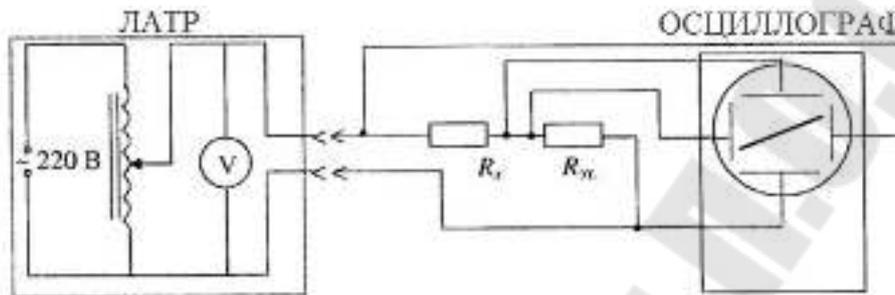


Рис. 14. Схема подключения приборов

Если на пластины осциллографа подать напряжение только с R_x , то на экране появится горизонтальная полоса длиной l_x . Так как в случае синусоидального напряжения длина прямой пропорциональна удвоенному амплитудному значению напряжения, то

$$U_x = \frac{l_x}{2k_x},$$

где k_x – чувствительность по оси «X».

Чтобы найти ток, текущий через R_x , последовательно с ним включается эталонное сопротивление $R_{эт.}$, значение которого известно с большой точностью. Через R_x и $R_{эт.}$ течет одинаковый ток. Напряжение с $R_{эт.}$ подается на пластины Y осциллографа. По длине полоски l_y рассчитывается напряжение

$$U_{эт} = \frac{l_y}{2k_y}, \text{ а затем ток } I = \frac{U_{эт}}{R_{эт}} = \frac{l_y}{2k_y R_{эт}}.$$

Если на пластины осциллографа одновременно подать напряжения сопротивлений R_x и $R_{эт.}$, то на экране появится наклонная полоса, выражающая зависимость между током и напряжением, т. е. закон Ома. Тогда неизвестное сопротивление можно рассчитать по формуле

$$R = \frac{U_x}{I} = \frac{l_x}{2k_x} : \frac{l_y}{2k_y R_{эт}} = \frac{R_{эт} k_y l_x}{k_x l_y}.$$

Измерение сдвига фаз φ . Для этого исследуемые напряжения U_x и U_y одинаковой частоты подводятся одновременно к соответствующим

щим пластинам электроннолучевой трубки. На экране наблюдается эллипс, который при $\varphi = 0$ и $\varphi = 180^\circ$ сжимается в прямую линию. Сдвиг фаз находится по размерам отрезков, отсекаемых эллипсом на осях координат в соответствии с формулой

$$\varphi = \pm \arcsin \frac{b}{B} = \pm \arcsin \frac{a}{A}.$$

Погрешность измерений порядка 5 % при φ близком к 0 и 180° , и сильно возрастает вблизи 90° и 270° . При подаче исследуемых напряжений через усилители каналов возникает дополнительная погрешность за счет разности фазовых сдвигов при усилении.

Наблюдение на экране вольтамперных характеристик $U(I)$ производится путем подачи переменного напряжения U требуемой величины одновременно к входу X осциллографа; одновременно напряжение, пропорциональное току I , снимается с резистора небольшого сопротивления R , включенного в цепь этого тока, и подается на вход Y . Для правильного воспроизведения характеристики необходимо, чтобы оба напряжения, подведенных к отклоняющим пластинам, совпадали по фазе.

Измерение емкости конденсатора. Для сравнения емкостей конденсаторов их поочередно включают в колебательный контур ($L_2 C_{\text{изм}}$), индуктивно связанный с генератором переменной ЭДС (ЗГ) через катушку L_1 (рис. 15).

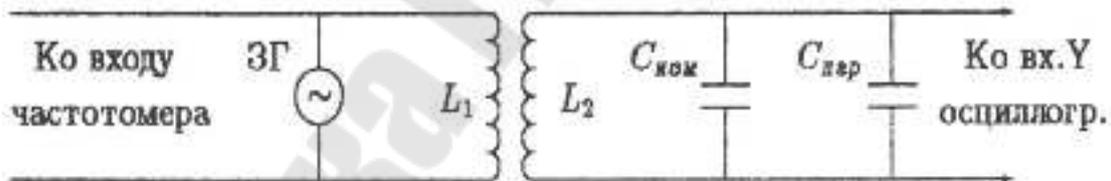


Рис. 15. Схема подключения приборов

Если частота ЭДС генератора совпадает с частотой собственных колебаний контура $L_2 C_{\text{изм}}$, то в контуре, активным сопротивлением которого можно пренебречь, резонансно возрастет амплитуда переменного тока и соответственно возрастет напряжение на входе « Y » осциллографа. Осциллограф необходим потому, что только его показания не зависят от частоты переменного тока. Таким образом, частоту резонанса можно определить по частотомеру, наблюдая за амплитудой отклонения электронного луча на экране осциллографа. Условие резонанса:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}.$$

Таким образом, измеряя частоту, соответствующую резонансу контура с эталонным конденсатором, вычисляем индуктивность контура:

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2} \frac{1}{\nu_{\text{эт}}^2 C_{\text{эт}}},$$

где $C_{\text{эт}}$ – емкость эталонного конденсатора; $\nu_{\text{эт}}$ – частота эталонного конденсатора.

Затем, чтобы определить емкость неизвестного конденсатора, его подключают к катушке вместо эталонного конденсатора, измеряют резонансную частоту и определяют электроемкость неизвестного конденсатора:

$$C_{\text{изм}} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{1}{\nu_{\text{изм}}^2 \cdot L_2} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{1}{\nu_{\text{изм}}^2} 4\pi^2 \nu_{\text{эт}}^2 C_{\text{эт}} = \frac{\nu_{\text{эт}}^2}{\nu_{\text{изм}}^2} C_{\text{эт}}.$$

Измерение индуктивности катушки. Используя зависимость амплитуды затухающих колебаний заряда от времени

$$q(t) = qe^{-\beta t} \cos(\omega t) = A_0 e^{\frac{Rt}{2L}} \cos\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)t$$

(на рис. 16 показан график зависимости заряда конденсатора от времени), можно найти закон изменения тока в электрической цепи, содержащей индуктивность, емкость и активное сопротивление для двух моментов времени, различающихся на один период:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -q_0 e^{-\beta t} \omega \cdot \sin(\omega t); \quad i(t+T) = -q_0 \cdot e^{-\beta(t+T)} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + 2\pi).$$

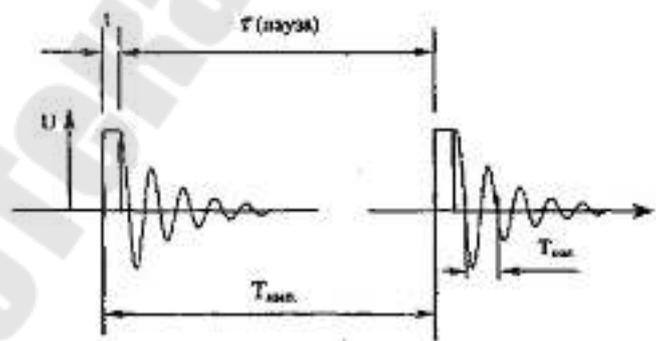


Рис. 16

Отношение двух амплитуд напряжения $u = iR$, различающихся по времени на один период будет равно $\frac{u(t)}{u(t+T)} = \frac{e^{-\beta t}}{e^{-\beta t - \beta T}} = e^{\beta T}$.

Натуральный логарифм такого отношения позволяет вычислить коэффициент затухания: $\beta = \frac{1}{T} \ln\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$. Поскольку отношение амплитуд есть безразмерный параметр, то сами амплитуды могут измеряться в любых (но одинаковых) единицах. Это могут быть вольты, миллиамперы, сантиметры и т. п. Собирая схемы с разными сопротивлениями контура и измеряя (в миллиметрах) амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе, различающиеся на период, можно для каждого сопротивления вычислить коэффициент затухания. Как следует из формулы $\beta = \frac{R}{2L}$, коэффициент затухания линейно растет с ростом сопротивления контура (рис. 17).

Поскольку «внутреннее» r_0 сопротивление катушки индуктивности и проводов неизвестно, то можно вычислить коэффициенты затухания $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ для схем, когда дополнительное сопротивление контура равно нулю $R_{\text{доп}} = 0$ или имеет заранее известные значения R_1 и R_2 (эталонные). Полученные данные позволяют построить линейный график $\beta = f(R_{\text{доп}})$ (рис. 17). Если интерполировать график до пересечения с осью абсцисс, то по точке пересечения графика с осью можно определить величину минимального внутреннего сопротивления контура.

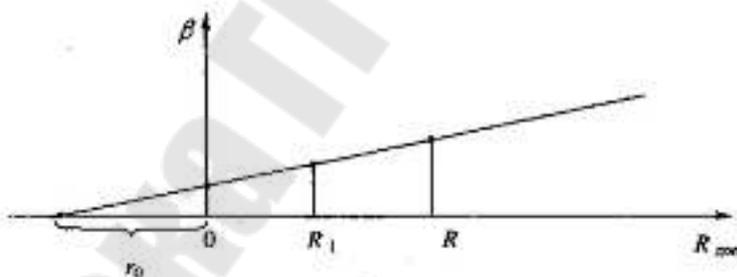


Рис. 17. Зависимость коэффициента затухания от сопротивления контура

Далее, используя формулу $\beta = \frac{r_0}{2L}$, можно вычислить индуктивность катушки $L = \frac{R}{2\beta}$.

Собрав электрическую схему согласно рис. 18, измеряем частоту следования коротких импульсов генератора и оцениваем с избранной надежностью погрешность этого измерения, измеряем по экрану длину одного цикла колебаний – это период импульсов в миллимет-

рах (рис. 16) и вычисляем масштаб развертки, приравнивая их, например:

$$T_{\text{имп}} = \frac{1}{2000} = 0,0005 \text{ с},$$

или в миллиметрах $T_{\text{имп}} = 50 \text{ мм}$.

Следовательно, $50 \text{ мм} = 0,0005 \text{ с}$ и окончательно имеем $1 \text{ мм} = 0,0001 \text{ с}$.

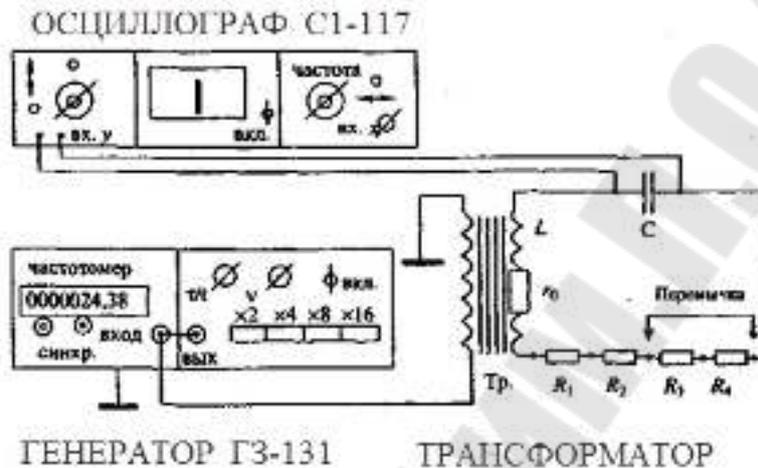


Рис. 18. Схема подключения к колебательному контуру

Измерив по экрану в миллиметрах $T_{\text{кол}}$ и с помощью масштаба переводя в секунды период затухающих колебаний в контуре, измеряем в миллиметрах амплитуды колебаний, различающихся по времени на один период.

Вычисляем коэффициент затухания контура. Изменяем сопротивление контура, подключив дополнительное сопротивление R_1 , и проделываем действия, аналогичные указанным выше, а затем с сопротивлением R_2 .

Строим линейный график зависимости $\beta = f(R_{\text{доп}})$ и по результатам интерполирования определяем значение r_0 (рис. 17).

Вычисляем индуктивность L катушки: $L = \frac{R}{2\beta}$.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение характеристик электроизмерительных приборов.

1. Получить у преподавателя приборы, характеристики которых следует определить.

2. Характеристики приборов (Приложение) и результаты вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики электроизмерительных приборов

№	Название прибора	Система прибора	Предел измерения	Класс точности	Цена деления	Абсолютная погрешность прибора
1						
2						

Задание 2. Рассчитать шунт и добавочное сопротивление в соответствии с заданием предложенным преподавателем.

Пример 1

Максимальное значение, которое может измерять миллиамперметр равно 100 мА. Как (нарисовать схему) и какое значение резистора (определить сопротивление шунта R_a) нужно подключить к миллиамперметру, чтобы он мог измерять силу тока до 1 А, если его внутреннее сопротивление 9 Ом.

Пример 2

Максимальное значение, которое может измерять милливольтметр равно 300 мВ. Как (нарисовать схему) и какое значение резистора (определить добавочное сопротивление $R_{доб}$) нужно подключить к милливольтметру, чтобы он мог измерять напряжение до 30 Вольт, если его внутреннее сопротивление 10 кОм.

Задание 3. Измерение амплитуды и частоты гармонического сигнала.

Подготовить осциллограф к измерениям.

Включите осциллограф в сеть 220 В и дайте ему прогреться 3–5 мин.

Если луч на экране отсутствует, то:

а) ручкой «☉», расположенной слева от экрана ЭЛТ, увеличить яркость луча;

б) переключатель «однократ, ждущ, АВТ» генератора развертки установить в нижнее положение «АВТ» – автоматический режим;

в) одновременно вращая две ручки «↔» и «↑» вывести луч на середину экран;

- г) ручку род работы установить в положение «~»;
 д) убедиться, что ручки плавной регулировки амплитуды и длительности сигнала повернуты по часовой стрелке до упора (щелчка).
 Отключить осциллограф от сети 220 В.
 Собрать электрическую схему согласно рис. 19.

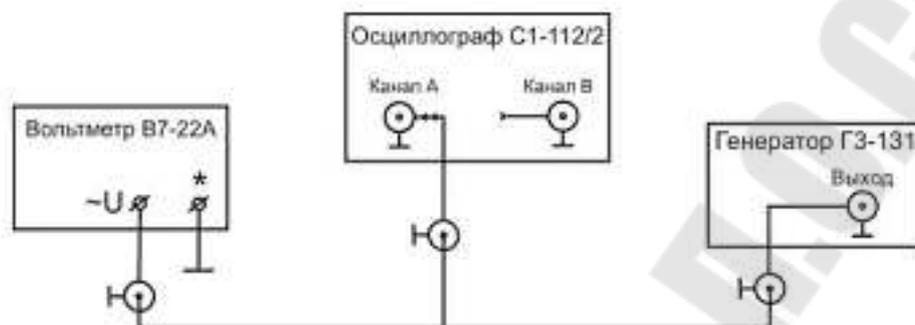


Рис. 19. Блок-схема для снятия АЧХ осциллографа

Включить в сеть 220 В вольтметр, генератор низкой частоты и осциллограф.

Подать на вход канала А осциллографа синусоидальный сигнал. Для этого:

а) получить у преподавателя значение напряжения U_V , которое необходимо установить на вольтметре В7-22А, вращая ручку «АМПЛ» низкочастотного генератора (напряжение U_V задавать в интервале от 1 В до 7 В);

б) вращая ручки на генераторе «грубо» и «плавно» получить устойчивое изображение синусоиды;

в) поворачивая на осциллографе ручку переключателя « $\frac{V}{\text{дел}}$ » по часовой стрелке, подберите такое ее положение, при котором измеряемый по вертикали отрезок, например, соответствующий размаху (двойной амплитуде) синусоиды займет как можно большую часть экрана по вертикали.

Измерить по осциллографу амплитуду сигнала в делениях шкалы осциллографа $L_y = \dots$ дел (больших). Умножить чувствительность осциллографа K_y по вертикали в единицах « $\frac{V}{\text{дел}}$ » на амплитуду сигнала L_y :

$$U_0 = K_y \cdot L_y.$$

Полученный ответ выразить в вольтах (В).

Найти действующее значение по формуле

$$U_{\text{осц}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Сравнить полученные значения с показанием вольтметра U_V .

Вычислить абсолютную ΔU и относительную ε_U погрешности измерения напряжения синусоидальных колебаний осциллографом, принимая за эталонный прибор цифровой вольтметр. При вычислениях учесть, что шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях напряжения.

Тогда

$$\Delta U = U_{\text{осц}} - U_V,$$

где ΔU – абсолютная погрешность измерения, $U_{\text{осц}}$ – величина напряжения, измеренная осциллографом, U_V – величина напряжения, измеренная вольтметром.

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U_V} 100 \%,$$

где ε_U – относительная погрешность измерений в процентах.

Измерить период сигнала в делениях шкалы осциллографа $L_x = \dots$ дел (больших). Умножить чувствительность усилителя K_x горизонтального отклонения в единицах « $\frac{\text{время}}{\text{дел}}$ » на период сигнала L_x :

$$T = K_x \cdot L_x.$$

Полученный ответ выразить в секундах (с).

По формуле $\nu_{\text{осц}} = \frac{1}{T}$ определить частоту колебаний в герцах (Гц).

Сравнить полученное значение $\nu_{\text{осц}}$ с показанием индикатора низкочастотного генератора $\nu_{\text{ген}}$.

Принимая за эталонный прибор цифровой измеритель частоты генератора, вычислить абсолютную $\Delta \nu$ и относительную ε_ν погрешности измерения частоты синусоидальных колебаний по формулам:

$$\Delta \nu = \nu_{\text{осц}} - \nu_{\text{ген}},$$

где $\Delta \nu$ – абсолютная погрешность измерения; $\nu_{\text{осц}}$ – частота колебаний, измеренная осциллографом, $\nu_{\text{ген}}$ – частота колебаний, измеренная генератором;

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v}{V_{\text{осц}}} 100 \%,$$

где ε_v – относительная погрешность измерений в процентах.

Контрольные вопросы

1. Классификация измерительных приборов, основные типы и их принцип работы.
2. Электронный осциллограф, его назначение, основные узлы осциллографа.
3. Проведение измерений с помощью осциллографа.
4. Устройство электронно-лучевой трубки.
5. Назначение блока питания, усилителей, генератора развертки, блока синхронизации, калибратора.
6. Определение амплитуды сигналов.
7. Определение периода колебаний и частоты.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1.1

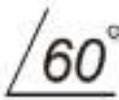
Знаки, обозначающие принцип действия прибора

Система прибора	Условное обозначение	Система прибора	Условное обозначение
Прибор магнито-электрический с подвижной рамкой		Логометр ферродинамический	
Логометр магнито-электрический		Прибор индукционный	
Прибор магнито-электрический с подвижным магнитом		Логометр индукционный	
Логометр магнито-электрический с подвижным магнитом		Прибор магнитоиндукционный	
Прибор электромагнитный		Прибор электростатический	
Логометр электромагнитный		Прибор вибрационный (язычковый)	
Прибор электромагнитный поляризованный		Прибор тепловой с нагреваемой нитью	
Прибор электродинамический		Прибор биметаллический	
Логометр электродинамический		Прибор электролитический	
Прибор ферродинамический		Прибор газоразрядный	

Таблица П.1.2

Дополнительные обозначения, указываемые на приборах

Наименование	Характеристика	Обозначение
Выпрямитель	Полупроводниковый	
	Электромеханический	
Преобразователь	Электронный	
	Вибрационно-импульсный	
	Термический изолированный	
	Неизолированный	
Защита от внешних полей	Магнитных (первая категория защищенности)	
	Электрических (первая категория защищенности)	
Род тока	Постоянный	
	Переменный однофазный	
	Постоянный и переменный	
	Трёхфазный переменный (общее обозначение)	
	Трёхфазный переменный при неравномерной нагрузке фаз	

Наименование	Характеристика	Обозначение
Класс точности	При нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например 1,5	1,5
	То же, при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы, например 1,5	
Положение шкалы	Горизонтальное	
	Вертикальное	
	Наклонное под определенным углом к горизонту, например 60°	
Предупредительный знак	Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ	
	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
	Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак выполняется красным цветом)	

Наименование	Характеристика	Обозначение
Обозначения зажимов, корректора и арретира	Отрицательный зажим	—
	Положительный зажим	+
	Зажим переменного тока (в комбинированных приборах)	— \sim
	Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)	*
	Генераторный зажим, (для ваттметров, варметров и фазометров)	*
	Зажим постоянного тока (в комбинированных приборах) в зависимости от полярности	+ или -
	Зажим, соединенный с подвижной частью (рамкой) прибора	
	Зажим, соединенный с экраном	Э или Экран
	Зажим, соединенный с корпусом	⊥
	Зажим, для заземления	
	Корректор	
	Арретир	Арр или Арретир
	Направление арретирования	↑ или ●

Обозначения эксплуатационных характеристик

Наименование	Условное обозначение	Наименование	Условное обозначение
Для работы в закрытых неотапливаемых помещениях (группа Б)	Б ₁ ; Б ₂ ; Б ₃	Для условий сухого и влажного тропического климата	Т
Для работы в полевых и морских условиях (группа В)	В ₁ ; В ₂ ; В ₃		
Тряскопрочные	ТП	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	ОП
Вибропрочные	ВП		
Нечувствительные к тряске	ТН	Сопротивление добавочное (общее обозначение)	ДС
Нечувствительные к вибрации	ВН		
Ударопрочные	УП	Шунт отдельный (наружный)	НШ
Брызгозащищенные	Бз	Трансформатор тока (общее обозначение)	ТТ
Водозащищенные	Вз	Трансформатор напряжения (общее обозначение)	ТН
Герметические	Гм		
Газозащищенные	Гз	Добавочное устройство	ДУ
Пылезащищенные	Пз	Термопреобразователь	ТП
Взрывобезопасные	Вб	Провода соединительные	СП

Литература

1. Панфилов, В. А. Электрические измерения / В. А. Панфилов. – М. : АСАДЕМА, 2004. – 283 с.
2. Электрорадиоизмерения / под ред. А. С. Сигова. – М. : ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005. – 378 с.
3. Электрические измерения / под ред. А. В. Фремке, Е. М. Душина. – Л. : Энергия, 1980. – 390 с.
4. Ранев, Г. Г. Методы и средства измерений / Г. Г. Ранев, А. П. Торавенко. – М. : АСАДЕМА, 2003. – 328 с.
5. Иванов, Б. С. Осциллограф – ваш помощник (как работать с осциллографом) / Б. С. Иванов. – М. : Символ-Р и ред. журн. «Радио», 1991. – 64 с.
6. Дьяконов, В. П. Современная осциллография и осциллографы / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 320 с.
7. Новопольский, В. А. Работа с электронно-лучевым осциллографом. Практический курс / В. А. Новопольский. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2001. – 176 с.
8. Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения : ГОСТ 23217–78 ; введ. 19.07.1978. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 21 с.

Содержание

Предисловие.....	3
Изучение основных характеристик электроизмерительных приборов.....	4
Классификация электроизмерительных приборов	4
Приборы магнитоэлектрической системы	6
Приборы электромагнитной системы.....	7
Приборы электродинамической системы.....	8
Приборы электростатической системы	9
Аналоговые приборы других систем	10
Назначение и порядок использования некоторых электроизмерительных приборов	10
Расчет погрешности измерений	11
Расширение пределов измерения электрических приборов	12
Цифровые измерительные приборы	13
Электронный осциллограф. Устройство и принцип действия	15
Измерения с помощью осциллографа	19
Порядок выполнения работы	24
Контрольные вопросы.....	28
Приложение	29
Литература	34

**Хило Петр Анатольевич
Кравченко Александр Ильич
Пискунов Сергей Васильевич**

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**Лабораторный практикум
по курсу «Физика»
для студентов всех специальностей
дневной формы обучения**

**Часть 2
Электричество и магнетизм**

Подписано в печать 21.06.12.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,03.

Изд. № 27.

<http://www.gstu.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.
Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48