

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2005

УДК 621.317(075)

ББК 32.842

М

М Авторы: О.Ю. Абрамов, С.А. Баруздин, А.А. Данилин, М.В. Дмитриук, А.С. Кривенко.

Метрология и радиоизмерения: Лабораторный практикум. Под ред. С.А. Баруздина. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2005. 90 с.

ISBN 5-06-004069-0

Представлены описания 7 лабораторных работ, выполняемых при изучении дисциплины «Метрология и радиоизмерения».

Предназначены для студентов факультета радиотехники и телекоммуникаций направлений 550400, 552500, 551100 и специальностей 200700, 201200, 201400, 201600, 200800.

УДК 621.317(075)

ББК 32.842

Рецензенты: кафедра телекоммуеикаций СПбГУАП
проф. В.И. Маккавеев

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 5-06-004069-0

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, Е.В. Федорова и др.; Под ред В.И. Нефедова. - М.: Высш. Шк., 2001.
2. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения. - М.: Радио и связь, 1993.
3. ГОСТ 16263-70 ГСОЕИ. Метрология. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1991.

Содержание

1. Электромеханические измерительные приборы	3
2. Электронно-лучевой осциллограф.....	16
3. Измерение фазового сдвига.....	28
4. Измерение параметров линейных компонентов цепей.....	39
5. Поверка измерительных генераторов.....	50
6. Измерение амплитудно-частотных характеристик с помощью генератора и вольтметра.....	62
7. Измерение параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом.....	70
Приложения.....	84

Метрология и радиоизмерения

Лабораторный практикум

Редактор Э.К. Долгатов
ЛР № 020617 от 24.06.98

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная
Печать офсетная. Гарнитура «Times». Усл. печ. л. . Уч.-изд. л.	
Тираж 350 экз. Заказ	

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы — изучение устройства, основных технических характеристик и применений электромеханических измерительных приборов магнитоэлектрической, электродинамической и электромагнитной систем. Измеряются величины постоянных и переменных напряжений и токов, производится анализ погрешностей измерений. Исследуется частотная зависимость показаний электромагнитного амперметра и производится косвенное измерение сопротивлений.

1.1. Краткие сведения об электромеханических измерительных приборах

Электромеханические приборы применяют для измерения напряжения, тока, мощности и других электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты. Название электроизмерительного прибора определяется его назначением. Различают вольтметры, амперметры, ваттметры, омметры, фазометры и комбинированные приборы - ампервольтметры, вольтомметры и другие.

По принципу действия электромеханические приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической, индукционной и некоторых других систем, используемых реже. Принадлежность прибора к той или иной системе обозначается условным значком на его шкале.

Метрологические свойства прибора характеризуют его класс точности. Он обозначается числом на шкале прибора и указывает предел приведенной погрешности прибора, выраженный в процентах.

Основой электромеханического прибора является измерительный механизм (ИМ), имеющий отсчетное устройство, неподвижную и подвижную части и демпфер для успокоения собственных колебаний последней. Кроме ИМ прибор может содержать шунты и добавочные резисторы, расширяющие пределы измерения и размещенные в том же корпусе. На подвижную часть ИМ действует вращающий момент, возникающий под действием токов и напряжений, функционально связанных с измеряемой величиной. Для его уравнивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части.

1.1.1. Магнитоэлектрические электроизмерительные приборы

Устройство магнитоэлектрического ИМ показано на рис. 1.1. Работа его основана на взаимодействии подвижной рамки 5, обтекаемой током, с полем постоянного магнита 1. Это поле с помощью магнитопровода 2, полюсных

наконечников 3 и цилиндрического сердечника 4, изготовленных из магнитомягкого материала, концентрируется в зазоре, где движется рамка 5, соединенная полуосью 8 со стрелкой 6. Рамка 5 намотана на легком алюминиевом каркасе, в котором при движении возникают вихревые токи, способствующие успокоению ее колебаний. Ток подводится к рамке через спиральные пружинки 7, создающие противодействующий момент.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока I_p на нее действует вращающий момент

$$M_{вр} = BS n I_p, \quad (1.1)$$

где B – величина индукции магнитного поля в зазоре; S – площадь рамки; n – число витков обмотки рамки.

Учитывая, что противодействующий момент пропорционален углу поворота рамки, из выражения (1.1) можно найти угол отклонения, при котором наступает равновесие подвижной части ИМ

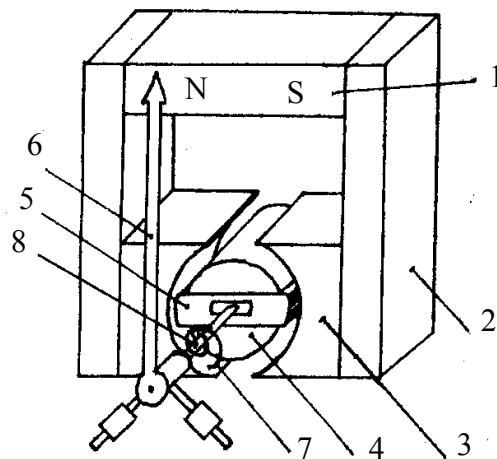


Рис. 1.1. Конструкция магнитоэлектрического измерительного механизма

$$\alpha = \frac{SBn}{W} I_p. \quad (1.2)$$

где W – коэффициент, зависящий от упругости пружинки. Коэффициент пропорциональности между углом отклонения и силой тока называется чувствительностью ИМ по току. Как следует из (1.2), при постоянстве индукции в зазоре чувствительность магнитоэлектрического ИМ постоянна и шкала линейна.

При протекании по обмотке рамки меняющегося во времени тока $i(t)$ выражение (1.1) будет описывать связь мгновенных значений тока рамки и действующего на нее вращающего момента.

Если частота изменения тока намного меньше частоты собственных механических колебаний подвижной части ИМ, то отклонение рамки определяется мгновенными значениями ее тока. Такой режим работы характерен для регистрирующих приборов, например, самописца.

Частота собственных механических колебаний рамки мала и в большинстве случаев при проведении радиоизмерений частота тока рамки значительно превосходит ее. В этом случае угол отклонения рамки пропорционален среднему значению тока (его постоянной составляющей)

$$I_{\text{po}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (1.3)$$

где T – период измеряемого тока или интервал усреднения, определяемый постоянной времени подвижной части ИМ, для непериодических токов.

Магнитоэлектрические приборы для измерения постоянных токов и напряжений строятся по схемам, изображенным на рис. 1.2, а, б, в.

Непосредственно магнитоэлектрический ИМ, без дополнительных элементов, используют для измерения малых токов (рис. 1.2, а) и напряжений. При измерении токов ИМ включают последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$. Для измерения значительных токов используют схему (рис. 1.2, б) с параллельным резистором – шунтом $R_{\text{ш}}$, по которому течет большая часть измеряемого тока. Предел измерения тока амперметра с шунтом определяется следующим образом:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{po}} (R_{\text{ш}} + R_{\text{p}}) / R_{\text{ш}}, \quad (1.4)$$

где R_{p} – сопротивление рамки ИМ; I_{po} – ток полного отклонения рамки.

Для расширения диапазона измеряемых напряжений используют добавочные резисторы $R_{\text{д}}$ (рис. 1.2, в). ИМ с последовательно включенным с ним добавочным резистором подключают к клеммам, на которых измеряется напряжение (параллельное включение). При этом предел измерения

$$U_{\text{max}} = I_{\text{po}} (R_{\text{д}} + R_{\text{p}}). \quad (1.5)$$

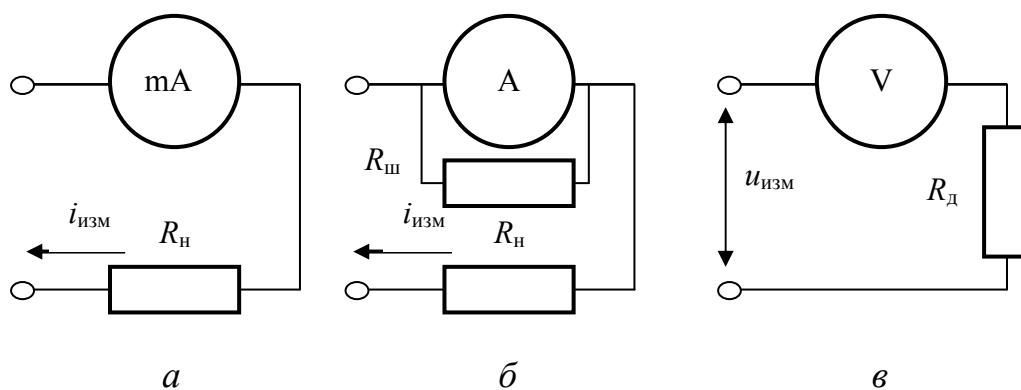


Рис. 1.2. Схемы включения магнитоэлектрических измерительных механизмов

Для измерения переменных токов совместно с магнитоэлектрическим ИМ используют дополнительные диодные выпрямители. Это позволяет измерять средневыпрямленное значение тока

$$I_{\text{ср.в.}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt,$$

$$\alpha = \frac{SBn}{W} I_{\text{ср.в.}}$$

Свойства магнитоэлектрических приборов. При работе с переменными токами приборы измеряют только постоянную составляющую протекающего через прибор тока (1.3). В магнитоэлектрическом ИМ применяют постоянные магниты с высоким значением величины магнитной индукции B , что обеспечивает высокую чувствительность механизма. По той же причине этот ИМ мало чувствителен к внешним магнитным полям. Кроме того, на магнитоэлектрический ИМ не действуют высокочастотные наводки.

Магнитоэлектрические ИМ относятся к числу точных. При использовании в них высокостабильных магнитов могут быть созданы приборы классов точности до 0,05.

К недостаткам приборов этой системы можно отнести их относительно высокую стоимость и малую стойкость к перегрузкам, обусловленную тем, что рамка ИМ, наматываемая тонким проводом, при значительных токах может выгорать.

1.1.2. Электродинамические электроизмерительные приборы

Устройство электродинамического ИМ поясняется рис. 1.3, а. Работа его основана на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами, взаимное расположение которых поясняется рис. 1.3, б. Неподвижную катушку 1 выполняют обычно из двух частей, между

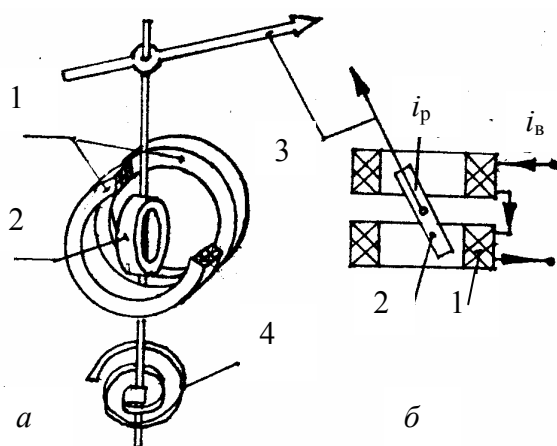


Рис. 1.3. Конструкция электродинамического измерительного механизма

которыми проходит ось с закрепленной на ней подвижной катушкой (рамкой) 2 и стрелкой 3. Спиральная пружинка 4 служит для создания противодействующего момента и подвода тока к рамке. Для уменьшения времени успокоения колебаний подвижной катушки применяют воздушный успокоитель.

Для получения зависимости угла поворота рамки электродинамического ИМ от токов, протекающих через его катушки, используют следующее обобщенное выражение вращающего момента, справедливое для всех электромеханических ИМ:

$$m_{\text{вр}} = dA/d\alpha = dW_{\text{эм}}/d\alpha, \quad (1.6)$$

где dA – работа, совершаемая при повороте рамки на угол $d\alpha$; $W_{\text{эм}}$ – энергия электромагнитного поля в ИМ. Для электродинамического ИМ

$$W_{\text{эм}} = \frac{1}{2} L_{\text{в}} i_{\text{в}}^2 + \frac{1}{2} L_{\text{р}} i_{\text{р}}^2 + M i_{\text{в}} i_{\text{р}}, \quad (1.7)$$

где $L_{\text{в}}$ и $L_{\text{р}}$ – индуктивности подвижной и неподвижной катушек соответственно; $i_{\text{в}}$ и $i_{\text{р}}$ – мгновенные значения токов, протекающих через катушки; M – взаимная индуктивность катушек.

При повороте рамки изменение энергии электромагнитного поля происходит за счет изменения взаимной индуктивности подвижной и неподвижной катушек. Используя (1.6) и (1.7), можно показать, что

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM}{d\delta} \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{в}}(t) i_{\text{р}}(t) dt, \quad (1.8)$$

где K и T имеют тот же смысл, что и в формулах (1.2) и (1.3).

Электродинамические приборы строятся по схеме с последовательным, параллельным или независимым включением катушек, что иллюстрируется рис. 1.4 а, б, в, где показаны соответственно схемы вольтметра, амперметра и ваттметра.

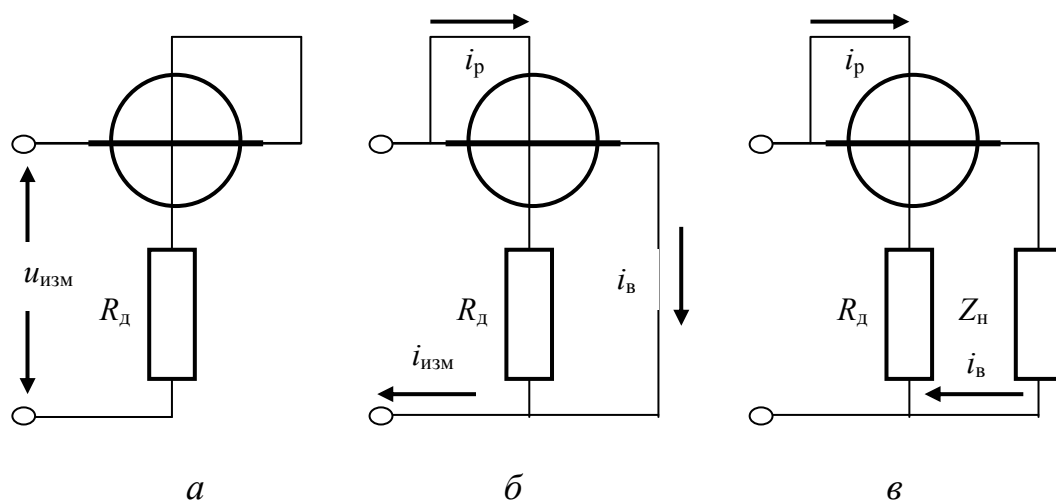


Рис. 1.4. Схемы включения электродинамических измерительных механизмов

Используя (1.8), можно показать, что для схемы, изображенной на рис. 1.4, а,

$$\alpha = \frac{1}{WR_{\text{д}}^2} \frac{dM}{d\alpha} U_{\text{изм}}^2, \quad (1.9)$$

где $U_{\text{изм}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{изм}}^2(t) dt}$ – среднеквадратическое значение измеряемого

напряжения. Подбирая форму и взаимное расположение катушек, стремятся выполнить следующее условие, при котором угол отклонения рамки пропорционален $U_{\text{изм}}$:

$$\frac{dM}{d\alpha} U_{\text{изм}} = \text{const} . \quad (1.10)$$

Для схемы, изображенной на рис. 1.4, б, можно таким же образом получить

$$\alpha = \frac{b}{W} \frac{dM}{d\alpha} I_{\text{изм}}^2 , \quad (1.11)$$

где $b = i_{\text{в}} i_{\text{р}} / i_{\text{изм}}^2$ – постоянный коэффициент; $I_{\text{изм}}$ – среднеквадратическое

значение измеряемого тока $I_{\text{изм}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{изм}}^2(t) dt}$. Ввиду того, что выражение

(1.11) подобно (1.9), условие линеаризации шкалы в этом случае будет аналогично (1.10).

Для схемы, изображенной на рис. 1.4, в,

$$\alpha = \frac{1}{WR_{\text{д}}} \frac{dM}{d\alpha} P_{\text{н}} , \quad (1.12)$$

где $P_{\text{н}}$ – активная мощность в нагрузке $Z_{\text{н}}$. Из выражения (1.12) следует условие линеаризации шкалы ваттметра $dM/d\alpha = \text{const}$, при выполнении которого отклонение рамки прибора пропорционально $P_{\text{н}}$.

На практике удастся сделать шкалу электродинамических приборов равномерной начиная с 15 ...20% от конечного ее значения.

Свойства электродинамических приборов. Электродинамические амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и поэтому могут использоваться для измерений в цепях не только постоянного, но и переменного тока.

Электродинамические приборы являются наиболее точными среди других приборов переменного тока, поскольку в них отсутствуют ферромагнитные элементы и, следовательно, отсутствуют и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков. Класс точности этих приборов – до 0.05 и лучше. Столь малая погрешность, однако, имеет место только на низких частотах (до 1.5 кГц), где не сказывается влияние индуктивности катушек.

К недостаткам приборов этой системы следует отнести чувствительность к внешним магнитным полям и наводкам, что требует тщательной экранировки. Кроме того, чувствительность у электродинамических приборов меньше, чем у приборов

магнитоэлектрических. Это вызвано невозможностью существенного увеличения параметра $dM/d\alpha$ в системе связи катушек.

1.1.3. Электромагнитные электроизмерительные приборы

Устройство электромагнитного ИМ показано на рис. 1.5. Работа его основана на взаимодействии подвижного ферромагнитного сердечника 2, укрепленного вместе со стрелкой 4 на оси 3, с неподвижной катушкой 1, обтекаемой током. Спиральная пружинка 5 используется здесь только для создания противодействующего момента. Успокоение колебаний подвижной части происходит за счет вихревых токов, возникающих в ферромагнитном сердечнике 2.

Для вывода зависимости угла поворота подвижной части такого прибора от протекающего через катушку тока можно воспользоваться (1.6). Учитывая, что при повороте сердечника изменение $W_{\text{эм}}$ происходит только за счет изменения индуктивности катушки L , можно показать, что $\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I_p^2$, где I_p – среднеквадратическое значение тока, протекающего через катушку. Подбирая форму подвижного сердечника, стремятся выполнить условие $I_p dL/d\alpha = \text{const}$, при котором угол отклонения подвижной части пропорционален среднеквадратическому значению тока а катушке.

Электромагнитные приборы включаются в цепь по тем же схемам, что и приборы магнитоэлектрические (см. рис. 1.2).

Свойства электромагнитных приборов. Как и электродинамические приборы, электромагнитные амперметры и вольтметры измеряют среднеквадратическое значение тока или напряжения и могут использоваться для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

Основное достоинство электромагнитных приборов – простота конструкции и связанная с этим высокая надежность и низкая стоимость. Кроме того, эти приборы довольно стойки к перегрузкам. Все это обусловило широкое применение электромагнитных приборов для контроля токов и напряжений в различных силовых цепях.

Существенным недостатком приборов этой системы является низкая точность и малая чувствительность, а также подверженность влиянию внешних магнитных полей.

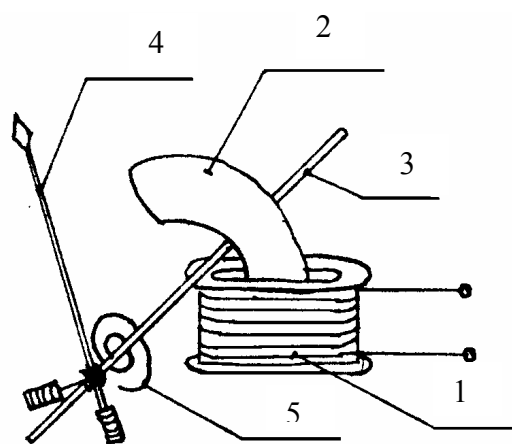


Рис. 1.5. Конструкция электромагнитного измерительного механизма

1.2. Погрешности электроизмерительных приборов

Для характеристики точности электроизмерительных приборов используют приведенную погрешность, определяемую как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению, которое принимают обычно равным конечному значению рабочей части шкалы прибора. Предел приведенной погрешности определяет класс точности прибора.

Предел относительной погрешности прибора для других значений шкалы

$$\delta_x = CX_{\max} / X_{\text{изм}} (\%), \quad (1.13)$$

где C – класс точности прибора; X_{\max} – предел измерений величины X ; $X_{\text{изм}}$ – измеренное значение этой величины. Погрешность имеет систематическую и случайную составляющие.

Из-за конечной величины внутреннего сопротивления прибора при включении его в цепь происходит нарушение режима работы цепи. Это вызывает методическую погрешность измерений. Так, при измерении тока в нагрузке R_H амперметром с внутренним сопротивлением R_p относительная методическая погрешность

$$\delta_I = 100R_p / (R_p + R_H) \%. \quad (1.14)$$

Основная составляющая погрешности обусловлена нестабильностью градуировки из-за температурных уходов и старения деталей ИМ, шунтов и дополнительных резисторов, трением в опорах подвижной части ИМ и другим факторам. Эта погрешность может иметь как случайную, так и систематическую составляющие.

При измерении переменных токов и напряжений электродинамическими приборами из-за влияния индуктивности их катушек возникает погрешность, зависящая от частоты. Так, показания электромагнитного амперметра зависят от частоты f следующим образом:

$$I(2\pi f) = I_0 / \sqrt{1 + (2\pi f L_p / (R_H + R_p))^2}, \quad (1.15)$$

где I_0 – показания прибора на низкой частоте; L_p и R_p – индуктивность и активное сопротивление катушки прибора; R_H – сопротивление нагрузки, через которое протекает ток. При этом L_p и R_p сами зависят от частоты, но на низких частотах этим можно пренебречь.

1.3. Описание лабораторного макета

Схема лабораторного макета приведена на рис. 1.6. Макет содержит исследуемые амперметры Р2 и Р3, первый из которых магнитоэлектрической, а второй – электромагнитной системы, а также эталонный прибор Р1 более

высокого класса точности (магнитоэлектрической системы) с шунтом $R_{ш}$ и дополнительными резисторами $R_{д2}$ и $R_{д3}$. Цепочка VD $R_{д1}$ используется при контроле амплитуды переменного входного напряжения.

В макете имеется источник напряжения G , на выходах 2 ...5 которого присутствуют постоянное напряжение, переменное напряжение частотой 50 Гц и пульсирующие напряжения той же частоты, полученные с помощью одно- и двухполупериодного выпрямителей. Кроме того, макет содержит набор нагрузочных резисторов $R_{н1}$ К $R_{н5}$.

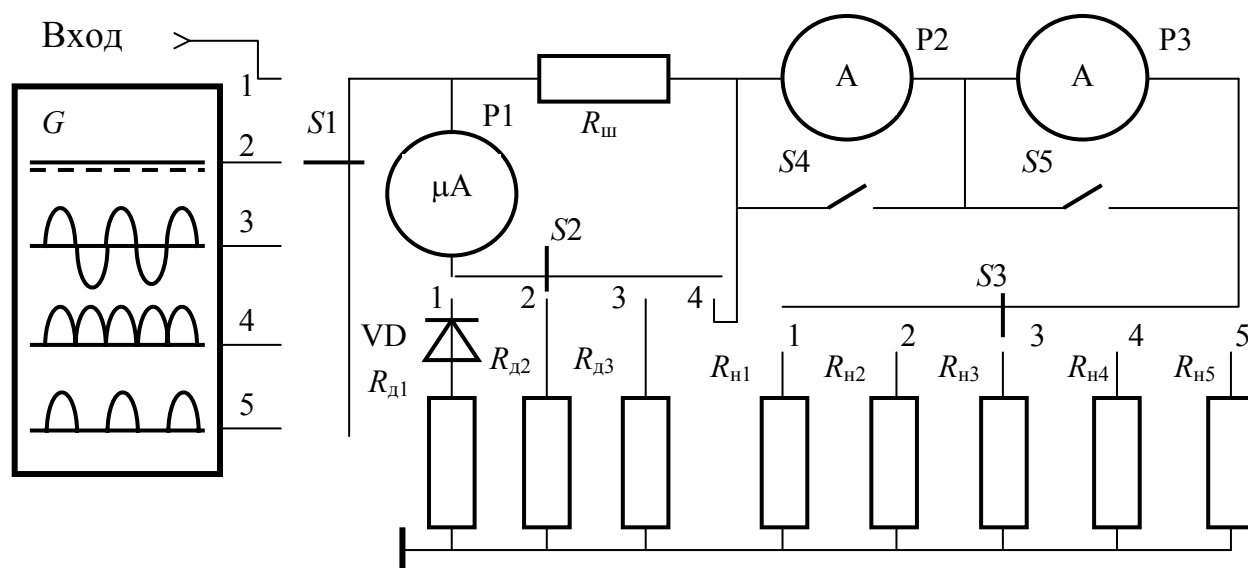


Рис. 1.6. Схема лабораторного макета

Параметры приборов и макета: $R_{д2}=29,3$ кОм, $R_{д3}=79,3$ кОм, $R_{ш}=0,069$ Ом, $R_{п1}=688$ Ом, $R_{п2}=0,06$ Ом, $R_{п3}=0,35$ Ом, $L_{п3}=81$ мкГн (при токе 1 А). Классы точности C приборов P1, P2, P3: 1,0; 2,5 и 2,5 соответственно. Максимальное значение тока рамки эталонного прибора $I_{р0}=100$ мкА.

1.4. Задание и указания к выполнению работы

1.4.1. Измерение постоянного тока и напряжения

Подайте на вход измерительной схемы макета постоянное напряжение, установив переключатель $S1$ на лабораторном макете в положение 2. Включите в схему амперметры P2 и P3, для чего тумблеры $S4$ и $S5$ выключите (разомкните).

Устанавливая переключатель $S3$ в положения 1 ... 5, измеряйте ток нагрузки амперметрами P2, P3 и эталонным прибором P1. Для измерения тока эталонный прибор подключается с помощью переключателя $S2$

параллельно шунту $R_{ш}$. Измеряйте также величину напряжения U_H на входе схемы с помощью эталонного прибора, который для этого подключается переключателем $S2$ к добавочному резистору $R_{д3}$.

Измерьте ток нагрузки эталонным прибором, последовательно выключая амперметры $P2$ и $P3$ с помощью тумблеров $S4$ и $S5$.

Рассчитайте предел относительной погрешности всех измерений тока амперметрами $P2$ и $P3$ с помощью (1.14), взяв величины R_H из результатов п. 1.4.4.

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1.1. Результаты измерений прибором $P1$ в протоколе будут выражены в делениях его шкалы. Рассчитайте пределы измерения эталонным прибором $P1$ тока и напряжения при использовании шунта $R_{ш}$ и добавочных резисторов $R_{д2}$ и $R_{д3}$. При расчете воспользуйтесь (1.4) и (1.5).

При оформлении отчета в табл. 1.1 следует пересчитать эти деления в единицы тока и напряжения, воспользовавшись формулами (1.4) и (1.5), а также свойством линейности шкалы прибора.

1.4.2. Измерение среднего и среднеквадратического значений пульсирующего и переменного тока

Переключателем $S3$ включите в схему нагрузочный резистор R_{H1} . Включите амперметры $P2$ и $P3$, разомкнув тумблеры $S4$ и $S5$.

Подавая на вход измерительной схемы с помощью переключателя $S1$ (положения 3 ... 5), напряжения различной формы, фиксируйте показания приборов $P2$ и $P3$. Одновременно измеряйте постоянную составляющую напряжения на входе схемы с помощью прибора $P1$, устанавливая переключатель $S2$ в положение 2 или 3, так, чтобы отклонение стрелки прибора было бы в пределах шкалы наибольшим. (При оформлении отчета пересчитайте показания прибора $P1$ в единицы напряжения, как это предписывалось в п. 1.4.1).

Рассчитайте предел относительной погрешности всех измерений исходя из класса точности приборов, как и в п. 1.4.1.

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1.2.

1.4.3. Исследование частотной зависимости показаний электромагнитного амперметра

Включите генератор низкой частоты ГЗ–109. Соедините кабелем клеммы ВЫХОД 2 генератора ГЗ–109 с гнездом ВХОД лабораторного макета. Установите переключатель НАГРУЗКА, Ω на лицевой панели ГЗ–109 в положение 5 Ом, а переключатель РЕГУЛИРОВКА ВЫХ. – в положение 15 V. С помощью переключателя $S1$ соедините выход генератора

низкой частоты со входом измерительной схемы, переключателем $S3$ включите в цепь резистор R_{H1} , а эталонный прибор $P1$ переключателем $S2$ подключите к цепочке VD $R_{д1}$ для контроля амплитуды переменного входного напряжения. С помощью тумблеров $S4$ и $S5$ включите в схему прибор $P3$ и выключите прибор $P2$.

Исследование частотной зависимости показаний электромагнитного амперметра $P3$ производите в диапазоне частот 0,05 ... 20 кГц. Для этого на частоте 50 Гц с помощью ручки РЕГУЛИРОВКА ВЫХ. генератора ГЗ–109 установите ток электромагнитного амперметра $P3$ 1А и зафиксируйте показания эталонного прибора $P1$. Далее изменяйте частоту генератора ГЗ–109, поддерживая амплитуду его выходного напряжения постоянной (контролируется прибором $P1$), и фиксируйте показания электромагнитного амперметра $P3$.

Используя (1.15), рассчитайте частотную зависимость показаний электромагнитного амперметра, взяв величину сопротивления R_{H1} из результатов п. 1.4.4.

Результаты занесите в таблицу 1.3. Постройте графики.

1.4.4. Расчет сопротивлений нагрузки

Этот пункт выполняется на основании результатов измерений, сделанных в п. 1.4.1. По измеренным значениям тока I_{P1} и напряжения U_H (табл. 1.1) при выключенных приборах $P2$ и $P3$ рассчитайте величину сопротивлений R_{H1} К R_{H5} (не забудьте при этом учесть сопротивление $R_{ш}$). Такой вид измерений называется косвенным.

При косвенных измерениях значение искомой величины находят по известной зависимости между этой величиной A и величинами x_i , определенными путем прямых измерений

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Абсолютная и относительная погрешности косвенного измерения при некоррелированных значениях погрешностей прямых измерений Δx_i определяется соответственно по формулам

$$\Delta A = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2}, \quad \delta_A = \frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta x_i}{A} \right)^2}. \quad (1.16)$$

В частном случае, когда $A = f(x_1, x_2, \dots, x_m) = x_1/x_2$, в соответствии с (1.16) будем иметь

$$\Delta A = \sqrt{\frac{x_1^2 (\Delta x_2)^2 + x_2^2 (\Delta x_1)^2}{x_2^4}}, \quad \delta_A = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2} \right)^2}. \quad (1.17)$$

В качестве оценки погрешности Δx_i в данном случае следует взять предел допустимой погрешности, определяемый через класс точности прибора $\Delta x_i = CX_{\max}/100$. Если значения относительной погрешности требуется выразить в процентах, то необходимо значения δ_A , определенные по формулам (1.16), (1.17) умножить на 100.

Рассчитайте предел относительной погрешности этих косвенных измерений по формуле (1.17). Результаты занесите в таблицу 1.4.

1.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать схему лабораторного макета, а также результаты измерений и расчетов, выполненных в соответствии с заданием, оформленные в виде таблиц и графиков.

1.7. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 1.1

R_n	U_n , В	δ_{U_n} , %	Положение переключателей S4 и S5								
			S4 и S5 выключены (разомкнуты)							S4 - вкл. S5 - вкл.	
			I_{p1} , А	I_{p2} , А	δ_{p2} , %	δ_{p2M} , %	I_{p3} , А	δ_{p3} , %	δ_{p3M} , %	I_{p1} , А	δ_{p1} , %
R_{n1}											
...											
R_{n5}											

Таблица 1.2

Положение переключателя S1	U_n , В	δ_{U_n} , %	I_{p2} , А	δ_{p2} , %	I_{p3} , А	δ_{p3} , %
3						
4						
5						

Таблица 1.3

f , кГц	0,05	0,5	2	5	10	15	20
I_{p3} , А (эксперимент)							
I_{p3} , А (расчет)							

Таблица 1.4

Параметр	Измеренные величины				
	R_{n1}	R_{n2}	R_{n3}	R_{n4}	R_{n5}
Сопротивление, Ом					

Относительная погрешность, %					
---------------------------------	--	--	--	--	--

1.8. Контрольные вопросы

1. Сравните основные типы электромеханических измерительных приборов.
2. Укажите источники погрешностей при измерении токов и напряжений электромеханическими приборами.
3. Поясните устройство электромеханического прибора магнитоэлектрической системы.
4. Поясните устройство электромеханического прибора электродинамической системы.
5. Поясните устройство электромеханического прибора электромагнитной системы.
6. Объясните влияние шунта и добавочного резистора на пределы измерения токов и напряжений электромеханическими приборами.
7. Что измеряют магнитоэлектрические, электродинамические и электромагнитные приборы, если протекающий через них ток является переменным?
8. Объясните влияние формы измеряемого напряжения или тока на показания электромеханических приборов различной системы.
9. Чем вызвана частотная зависимость показаний прибора электромагнитной системы?
10. Укажите источники погрешностей при косвенном измерении сопротивлений.
11. Укажите возможные причины расхождения между экспериментально полученной частотной зависимостью показаний электромагнитного амперметра и данными теоретического расчета.
12. Определите показания магнитоэлектрического амперметра, если через него протекает в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 100 мА, длительностью 1 мс и периодом 10 мс.
13. Определите показания электродинамического вольтметра при измерении напряжения в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 5 В, длительностью 100 мкс и периодом 10 мс.
14. Определите пределы допустимых абсолютной и относительной погрешностей амперметра, если его верхний предел измерений 1 А, а класс точности прибора 1,0.

2. ЭЛЕКТРОННО–ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Цель работы — изучение структурной схемы и принципа действия однолучевого и двухлучевого осциллографов, основных методов осциллографических измерений, а также получение навыков проведения осциллографических измерений.

2.1. Принцип действия и структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа

Электронно-лучевой осциллограф (ЭЛО) – прибор, предназначенный для исследования формы и измерения амплитудных и временных параметров электрических сигналов.

Основным элементом ЭЛО является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) с электростатическим управлением лучом. Эмитированный катодом К поток электронов ускоряется и фокусируется тремя анодами A_1 , A_2 и A_3 и бомбардирует люминесцентный экран, вызывая свечение. Плотность потока электронов регулируется потенциалом модулятора М, при этом меняется яркость свечения. Две пары пластин ЭЛТ отклоняют луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Исследуемый сигнал как функция времени $u = f(t)$ изображается в прямоугольной системе координат, абсциссой которой является время, а ординатой – мгновенное значение сигнала. Для получения равномерной шкалы оси времени необходимо, чтобы луч отклонялся в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Для этого к горизонтально отклоняющим пластинам подводится линейно изменяющееся (пилообразное) напряжение. Исследуемый сигнал подводится к вертикально отклоняющим пластинам. В результате траектория луча на экране образует осциллограмму, соответствующую форме исследуемого сигнала.

При исследовании периодических сигналов для получения их неподвижного изображения на экране ЭЛТ необходимо, чтобы периоды повторения исследуемого T и развертывающего T_p напряжений были кратны $T_p/T = n$, где $n = 1, 2, \dots$. В противном случае начало развертки будет совпадать с различными точками исследуемого сигнала, и изображение на экране ЭЛТ будет смещаться. Во избежание этого в осциллографах предусматривается синхронизация начала развертки. Синхронизация может осуществляться либо от исследуемого сигнала (внутренняя синхронизация), либо от внешнего сигнала, синхронного с исследуемым (внешняя синхронизация).

При исследовании непериодических сигналов развертка может запускаться как исследуемым, так и внешним сигналами.

Структурная схема универсального осциллографа представлено на рис. 2.1. Она включает в себя каналы вертикального (Y) и горизонтального (X) отклонений, канал Z, служащий для модуляции луча, ЭЛТ, а также калибратор. Осциллограф содержит также блок питания, не показанный на схеме.

Канал вертикального отклонения служит для усиления или ослабления входного сигнала до величины, удобной для наблюдения на экране ЭЛТ, и включает калиброванный аттенюатор, предварительный усилитель, линию задержки и окончательный усилитель.

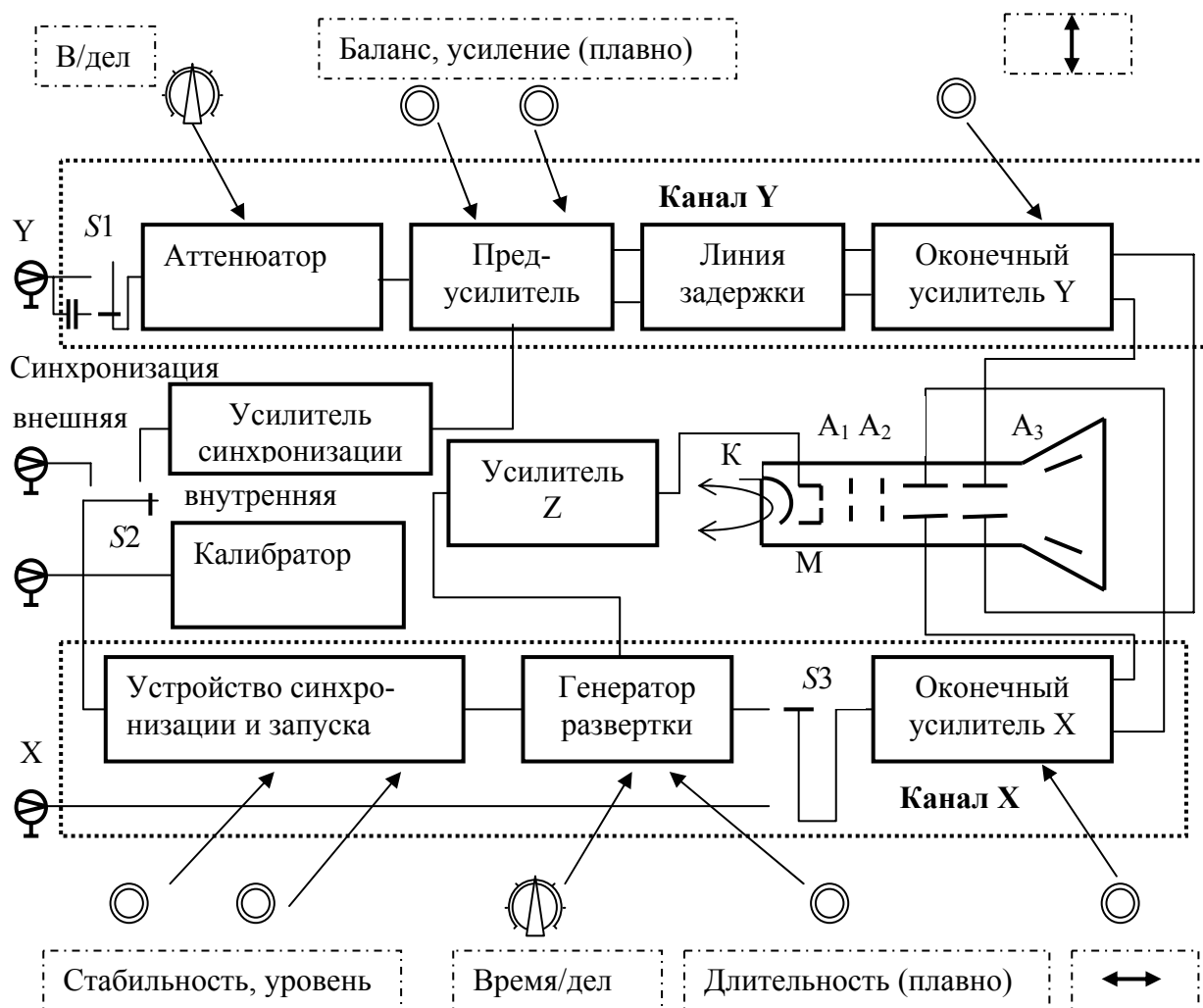


Рис. 2.1. Структурная схема универсального осциллографа

Аттенюатор служит для ослабления исследуемого сигнала, ему предшествует переключатель S1, через который сигнал поступает на вход аттенюатора либо непосредственно (открытый вход), либо через разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую исследуемого напряжения (закрытый вход). Далее сигнал усиливается в предварительном усилителе, имеющем симметричный выход. В нем имеется

возможность плавной регулировки коэффициента усиления и балансировки усилителя регулировкой *баланс* для предотвращения смещения осциллограммы по вертикали при изменении коэффициента отклонения.

Линия задержки обеспечивает подачу исследуемого сигнала на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ с задержкой относительно начала развертки, что позволяет наблюдать начальный участок сигнала, например, фронт импульса.

Оконечный усилитель Y увеличивает сигнал до уровня, позволяющего получить достаточный по вертикали размер сигнала на экране ЭЛТ. Кроме того, окончательный усилитель обеспечивает симметричный выход для подачи напряжения на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Это означает, что напряжение на верхней пластине положительно относительно земляной шины, а напряжение на верхней - отрицательно. В отличие от этого входное напряжение осциллографа поступает на вход в несимметричном виде, то есть измеряется относительно земляной шины. В усилителе также осуществляется регулировка смещения осциллограммы по вертикали ручкой \updownarrow (в некоторых осциллографах эта регулировка осуществляется в предварительном усилителе).

Канал горизонтального отклонения предназначен для создания развертывающего напряжения, синхронного с исследуемым сигналом, и включает устройство синхронизации и запуска, генератор развертки, окончательный усилитель X .

Устройство синхронизации и запуска может работать в режиме внутренней синхронизации от исследуемого сигнала, поступающего из канала Y через усилитель синхронизации, или в режиме внешней синхронизации в зависимости от положения переключателя $S2$. В последнем случае сигналы синхронизации подаются на вход внешней синхронизации. Устройство синхронизации и запуска вырабатывает импульсы запуска генератора развертки. Регулировка *уровень* устанавливает уровень напряжения, по которому осуществляется запуск генератора развертки, регулировка *стабильность* позволяет улучшать синхронизацию высокочастотных сигналов ($ВЧ$).

Генератор развертки формирует линейное пилообразное напряжение, используемое для горизонтального отклонения луча. Это напряжение характеризуется амплитудой U_m , периодом T_p , длительностями прямого $t_{пр}$ и обратного $t_{обр}$ хода, а также временем блокировки $t_{бл}$ (рис. 2.2).

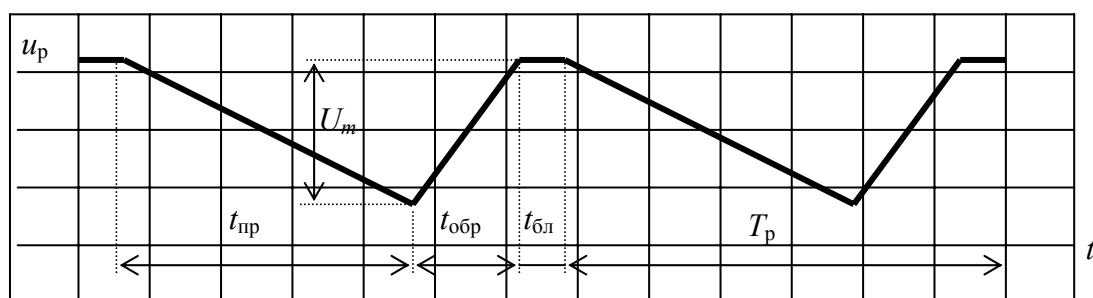


Рис. 2.2. Временная диаграмма напряжения генератора развертки

Генератор развертки может работать в автоколебательном, ждущем и однократном режимах. В ждущем режиме развертка возникает тогда, когда поступает запускающий импульс со схемы синхронизации и запуска. Этот импульс может формироваться как из исследуемого сигнала в режиме внутренней синхронизации, так и от специального импульса в режиме внешней синхронизации. В автоколебательном режиме генератор развертки формирует периодическое пилообразное напряжение. В этом случае напряжение развертки вырабатывается даже при отсутствии исследуемого сигнала в режиме внутренней синхронизации. Однократная развертка используется при фотографировании осциллограмм. В генераторе развертки осуществляется дискретная регулировка коэффициента развертки и его плавная регулировка.

Запуск генератора развертки может осуществляться как по положительному перепаду уровня сигнала (+), так и по отрицательному (-). Момент запуска развертки привязывается к определенному уровню сигнала. На рис. 2.3 представлены временные диаграммы исследуемого сигнала (а), напряжение генератора развертки в режиме внутренней синхронизации при запуске по положительному перепаду (+) от уровня U_1 (б), напряжение генератора развертки при запуске по отрицательному перепаду (-) от уровня U_2 (в), а также вид соответствующих осциллограмм на экране осциллографа (г) и (д). На представленных осциллограммах для простоты не принято во внимание наличие линии задержки в канале Y.

Оконечный усилитель X усиливает напряжение развертки до заданного уровня, а также обеспечивает симметричную подачу напряжения на горизонтально отклоняющие пластины. В нем также осуществляется регулировка смещения осциллограммы по горизонтали ручкой . В ряде осциллографов предусматривается возможность подачи на X-канал внешних сигналов (XY-режим) с помощью переключателя S3. Генератор развертки при этом отключают.

Усилитель канала Z усиливает импульсы, поступающие от генератора развертки на модулятор ЭЛТ, чем обеспечивается подсвет линии луча во время прямого хода развертки. При этом длительность импульса подсвета и его положение совпадает с длительностью прямого хода напряжения развертки. Этот режим обеспечивает свечение экрана только при движении луча слева направо. Обратный ход луча справа налево остается невидимым (гашение обратного хода). В некоторых осциллографах на этот усилитель могут подаваться также внешние сигналы для модуляции яркости осциллограмм.

Калибратор вырабатывает сигнал с известными параметрами, необходимый для калибровки каналов вертикального и горизонтального отклонения луча. Обычно это периодическая последовательность прямоугольных импульсов (меандр) с известными амплитудой U_K и периодом T_K (на осциллографе указывается не период, а частота повторения $F_K=1/T_K$).

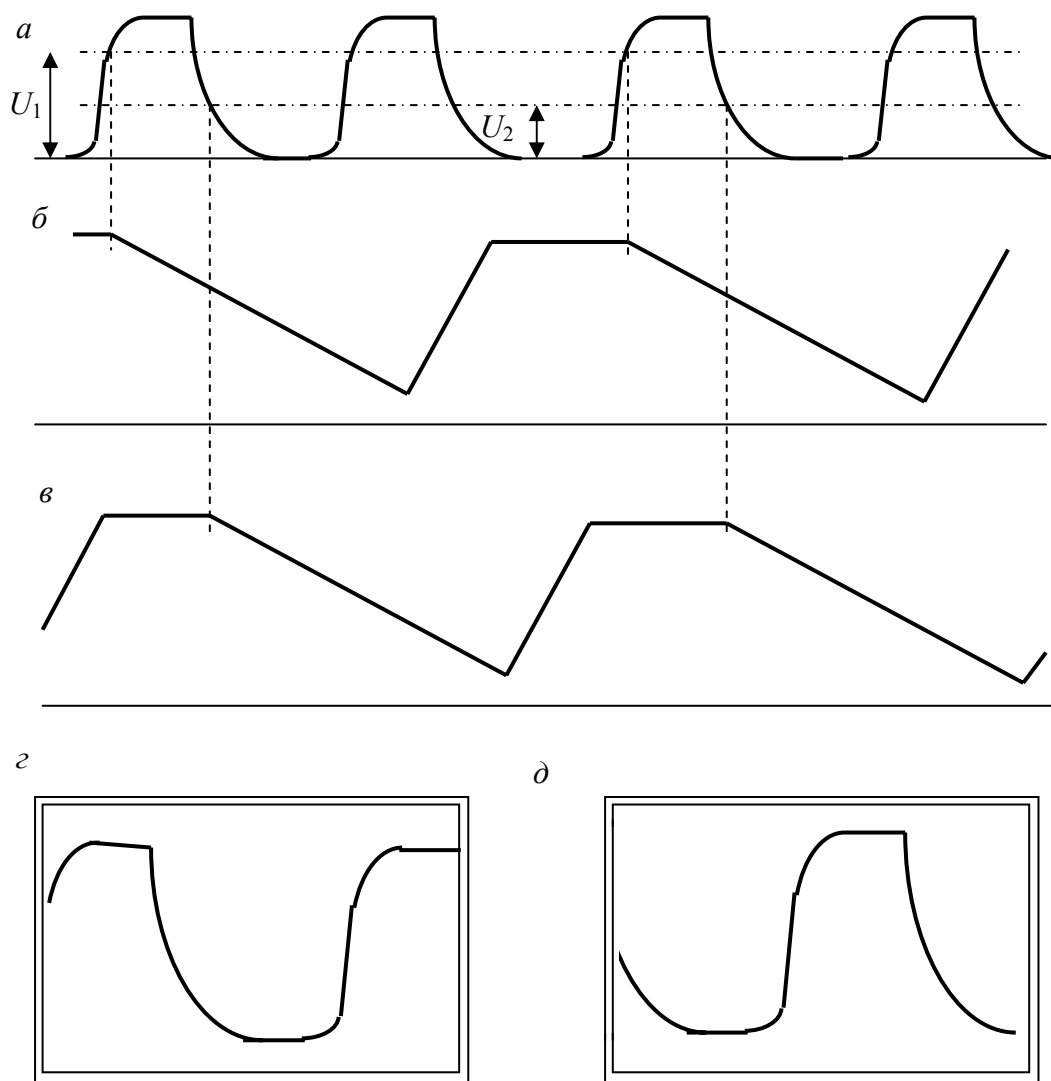


Рис. 2.3. Временные диаграммы исследуемого сигнала (а), напряжение генератора развертки при запуске по положительному перепаду (+) от уровня U_1 (б), напряжение генератора развертки при запуске по отрицательному перепаду (-) от уровня U_2 (в), а также вид соответствующих осциллограмм на экране осциллографа (г) и (д).

Рассмотренная структурная схема соответствует однолучевому универсальному осциллографу. Для одновременного наблюдения на экране осциллограмм двух сигналов применяют двухлучевые осциллографы, в которых используются двухлучевые ЭЛТ. При этом структурная схема двухлучевого осциллографа содержит два канала вертикального отклонения Y_1 и Y_2 .

2.2. Основные характеристики универсальных осциллографов

Рабочая часть экрана – часть экрана, в пределах которой нормированы основные погрешности измерения.

Полоса пропускания канала Y – диапазон частот, в пределах которого значение амплитудно-частотной характеристики не отличается более чем на 3 дБ от ее значения на опорной (относительно низкой) частоте. Полоса пропускания задается верхней граничной частотой f_B .

Время нарастания переходной характеристики канала Y – интервал времени, в течение которого переходная характеристика нарастает от уровня 0,1 до уровня 0,9 установившегося значения. Время нарастания t_H связано с верхней граничной частотой соотношением $t_H = 350/f_B$, где t_H выражено в наносекундах, а f_B – в мегагерцах.

Входное сопротивление и входная емкость Y канала осциллографа. Эти параметры влияют на методическую погрешность измерения, связанную с нарушением электрического режима исследуемой цепи при подключении к ней осциллографа. Для уменьшения этого влияния используют выносные делители напряжения, характеризующиеся большим входным сопротивлением и малой входной емкостью.

Коэффициент отклонения K_O – отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча, вызванному этим напряжением, В/дел. или мВ/дел. Величина, обратная коэффициенту отклонения, называется чувствительностью. Регулировка коэффициента отклонения осуществляется во входном аттенуаторе.

Коэффициент развертки K_p – время, за которое луч проходит одно деление шкалы на экране ЭЛТ, с/дел., мс/дел., мкс/дел. Регулировка коэффициента развертки производится путем изменения длительности прямого хода $t_{пр}$ генератора развертки.

2.3. Измерение напряжений и временных интервалов

В большинстве современных осциллографов при измерении амплитуды и временных интервалов используется метод калиброванных шкал. Перед измерениями предварительно калибруют вертикальную и горизонтальную шкалы осциллографа, используя сигнал калибратора с известными параметрами.

Величина измеряемого напряжения определяется соотношением $U = b K_o$, где b – отсчитанный размер изображения по вертикали, дел., K_o – коэффициент отклонения.

Аналогично измеряется временной интервал $T = a K_p$, где a – отсчитанный размер изображения по горизонтали, дел., K_p – коэффициент развертки.

В ряде осциллографов имеется режим растяжки развертки в M раз за счет увеличения амплитуды напряжения развертки. При этом часть осциллограммы, находящаяся в центре экрана ЭЛТ, наблюдается в увеличенном масштабе. В режиме растяжки величина измеряемого временного интервала определяется соотношением $T = a K_p M$. Обычно множитель растяжки $M = 0,1$ или $0,2$.

2.4. Задание и указания к выполнению работы

2.4.1. Калибровка осциллографа С1-65

Выберите автоколебательный режим работы осциллографа С1-65 с внутренней синхронизацией. Для этого установите органы управления осциллографа С1-65 в следующие положения:

УСИЛИТЕЛЬ Y – коэффициент отклонения $0,05V/\text{дел.}$; ручку ПЛАВНО в положение ▼;

РАЗВЕРТКА – АВТ. (знак Z), коэффициент развертки $0,5 \text{ ms}/\text{дел.}$, $\times 1$, ручку ПЛАВНО в положение ▼;

СИНХРОНИЗАЦИЯ – ВНУТР., +, ~.

Проверьте калибровку длительности развертки осциллографа. Для этого установите ручки КАЛИБРАТОРА в положение 200 mV , $\square\square$ 1 kHz . Подсоедините кабелем гнезда КАЛИБРАТОРА \ominus и \oplus к входу усилителя Y , переключатель входа установите в положение ?.

Вращая ручку СИНХРОНИЗАЦИЯ УРОВЕНЬ добейтесь устойчивого изображения сигнала калибратора на экране осциллографа.

Измерьте период напряжения развертки осциллографа T_k . Для этого измерьте этот период a с точностью до $0,1$ дел. и умножьте результат на коэффициент развертки $T_k = a K_p$. Результат сравните с точным значением периода $T_k = F_k$ ($F_k = 1 \text{ кГц}$). При правильной калибровке эти значения должны совпадать.

Произведите калибровку Y канала осциллографа. Для этого произведите измерение амплитуды сигнала калибратора b , выраженной в делениях, а затем рассчитайте ее значения по формуле $U = bK_0$. Результаты занесите в таблицу 2.1. Сравните установленное значение амплитуды сигнала калибратора с измеренным значением и при необходимости произведите регулировку коэффициента усиления предусилителя канала Y ручкой, выведенной под шлиц. Затем проверьте калибровку осциллографа для напряжений калибратора 1 и 20 V, регулируя при этом коэффициент отклонения так, чтобы размер изображения по вертикали был не менее 3 делений.

2.4.2. Измерение параметров напряжения развертки осциллографа С1-65

Установите органы управления осциллографов в следующие положения:

С1-65: РАЗВЕРТКА: $\times 1$, 01 $\mu\text{s}/\text{дел.}$, АВТ (знак Z);

СИНХРОНИЗАЦИЯ: ВНУТР, +, \sim ;

С1-96: УСИЛИТЕЛЬ Y2: 2V/дел.;

РАЗВЕРТКА: $\times 1$, 2 $\mu\text{s}/\text{дел.}$, АВТ.;

СИНХРОНИЗАЦИЯ: Y2, \sim .

Соедините кабелем гнезда генератора развертки $\sqrt{\quad}$ и \oplus осциллографа С1-65 со входом усилителя Y2 осциллографа С1-96. Добейтесь устойчивого изображения напряжения вращением ручки СИНХРОНИЗАЦИЯ УРОВЕНЬ осциллографа С1-96. Проведите измерения длительности прямого хода $t_{\text{пр}} = a_1 K_p$, периода $T_p = a_2 K_p$ и амплитуды напряжения развертки $U_m = bK_0$ (здесь a_1 , a_2 и b - соответственно длительность прямого хода, период и перепад напряжения развертки, выраженные в делениях согласно рис. 2.2, коэффициент развертки осциллографа С1-96 K_p - масштабный множитель оси X, выраженный в мс/дел. или мкс/дел., коэффициент отклонения Осциллографа С1-96 K_0 - масштабный множитель оси Y, выраженный в В/дел. или мВ/дел.) для значений коэффициента развертки осциллографа С1-65, равного 0,1 $\mu\text{s}/\text{дел.}$ Результаты измерений занесите в таблицу 2.2. При этом обязательно записывайте размерность масштабных коэффициентов K_p и K_0 , не забывайте делать это и в последующих пунктах работы для правильного оформления результатов измерений временных и амплитудных параметров сигналов.

2.4.3. Измерение параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов генератора Г5-54

Соедините разъем СИНХРОИМПУЛЬСЫ генератора Г5-54 кабелем с разъемом \oplus X осциллографа С1-65. Соедините также кабелями выходы 1:10 и 1:1 генератора Г5-54 со входами канала Y осциллографа С1-65 и

канала Y осциллографа С1-96 соответственно. Схема соединения представлена на рис. 2.4.

В генераторе Г5-54 имеются белые и черные шкалы установки параметров, а также белые и черные клавиши множителей этих параметров. При нажатии белой клавиши следует пользоваться белой шкалой соответствующего параметра, а в противном случае – черной. Установите органы управления генератора Г5-54 в следующие положения: ЧАСТОТА ПОВТОРЕНИЯ 10 kHz; ВРЕМЕННОЙ СДВИГ $8\mu\text{s}$; ДЛИТЕЛЬНОСТЬ $7\mu\text{s}$; АМПЛИТУДА 20 V; полярность . Нажмите одновременно обе клавиши множителя выходного напряжения $\times 0,03$, что обеспечит поступление сигнала с обоих выходных разъемов 1:1 и 1:10.

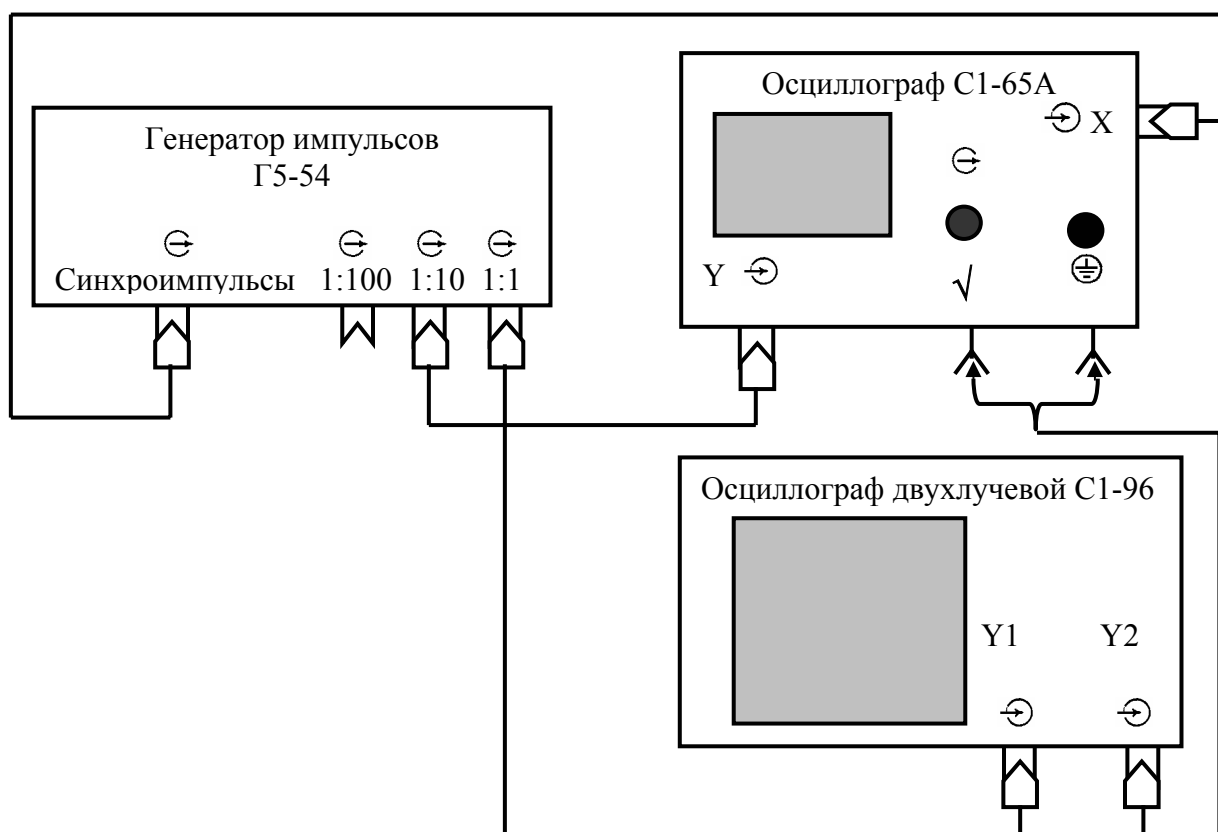


Рис. 2.4. Схема соединения приборов

Переключите развертку осциллографа С1-65 в режим АВТ и установите коэффициент развертки так, чтобы на экране появилось 5 ...6 импульсов. На экране осциллографа С1-96 одновременно наблюдайте импульсную последовательность, поданную на канал Y1, и напряжение развертки осциллографа С1-65, поступающее на каналы Y2. При этом установите коэффициент развертки осциллографа С1-96 так, чтобы на экране наблюдалось 2 ...4 периода напряжения развертки. При неустойчивом

изображении регулируйте ручки СИНХРОНИЗАЦИЯ УРОВЕНЬ сначала на осциллографе С1-65, а затем на осциллографе С1-96. **Зарисуйте осциллограммы № 1 и № 2 с обоих осциллографов.** Определите по осциллограмме с осциллографа С1-96 количество импульсов, которое укладывается на интервале, соответствующем длительности прямого хода напряжения развертки. Сравните результат с количеством импульсов N , наблюдаемых на экране осциллографа С1-65.

Установите коэффициент развертки осциллографа С1-65 таким, чтобы на его экране появился один импульс последовательности, и **зарисуйте осциллограммы № 3 и № 4 с обоих осциллографов**, предварительно установив удобный коэффициент развертки на осциллографе С1-96. Определите по осциллограмме с осциллографа С1-96 сколько импульсов укладывается на интервале, соответствующем длительности прямого хода напряжения развертки. Сравните результат с количеством наблюдаемых на экране осциллографа С1-65 импульсов N . В отчете укажите, от чего зависит количество наблюдаемых на экране ЭЛО импульсов?

Переведите осциллограф С1-65 в режим внешней синхронизации, для чего переключатель синхронизации установите в положение ВНЕШ 1:1. **Отметьте пунктиром на осциллограммах № 3 и № 4 произошедшие изменения** и сравните их с осциллограммами, полученными в режиме внутренней синхронизации. В отчете объясните, почему отличаются зарисованные осциллограммы?

Выключите осциллограф С1-96, последующие измерения проводятся только с помощью осциллографа С1-65.

Проведите измерение периода $T=1/F$ (F – частота повторения импульсов), временного сдвига t_c начала импульса относительно начала развертки, длительности τ и амплитуды U_m импульсной последовательности и сравните их с соответствующими значениями, установленными на генераторе Г5-54: $F=10^4$ Гц; $t_c=8$ мкс; $\tau=7$ мкс; $U_m=20 \times 0,03:10$ В.

Определите относительную разность измеренных A_u и установленных A_y параметров $(A_u - A_y) 100/A_y \%$. Результаты занесите в таблицу 2.3.

2.4.4. Измерение параметров прямоугольных импульсов в режиме растяжки длительности развертки

Установите следующие параметры импульсной последовательности на генераторе Г5-54: $F=10^4$ Гц, $t_c=0,8$ мкс, $\tau=0,1$ мкс и $U_m=50 \times 0,03:10$ В.

Измерьте длительность импульса τ , а также длительности фронта τ_f и среза τ_c . Эти параметры регламентируются ГОСТом и определяются в соответствии с рис. 2.5. При измерении параметров импульса воспользуйтесь режимом растяжки развертки. Для этого ручками

осциллографа С1-65 переместите импульс в центр экрана и переведите переключатель развертки в положение $\times 0,1$. При этом коэффициент развертки уменьшается в 10 раз. Отрегулируйте коэффициент отклонения в том числе и ручкой ПЛАВНО, так, чтобы амплитуда импульса была равна 8 делениям. При этом точечные горизонтальные линии соответствуют уровням 0.1 и 0.9. Коэффициент развертки установите таким, чтобы исследуемый участок сигнала занимал как можно большую часть ширины экрана. Длительность импульса определите по уровню 0,5 от амплитудного значения (рис. 2.4). Результаты измерений занесите в таблицу 2.4.

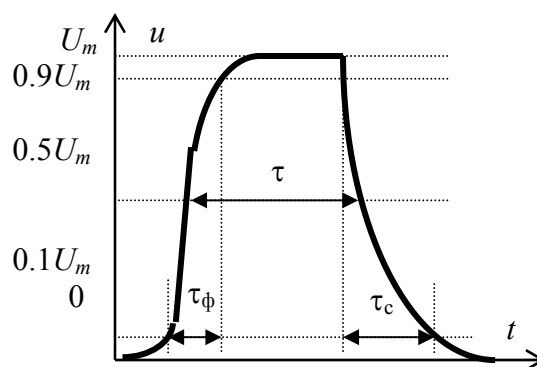


Рис. 2.5. Параметры импульса

Установите длительность импульса генератора $\tau = 1$ мкс и вновь проведите измерения длительности импульса, а также длительностей фронта и среза. Результаты занесите в таблицу 2.4.

2.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему универсального ЭЛО, таблицы с результатами измерений и расчетов, 4 осциллограммы и выводы по п. 2.4.3.

2.6. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 2.1

Напряжение калибратора U_k	Коэффициент отклонения K_o	Измеряемое напряжение	
		b	$U = bK_o$

Таблица 2.2

a_1 , дел.	a_2 , дел.	K_p	$t_{пр} = a_1 K_p$	$T_p = a_2 K_p$	b , дел.	K_o	$U_m = bK_o$

Таблица 2.3

Параметр	Установленный параметр генератора	a или b , дел.	K_p или K_o	Измеренный параметр $A_{и} = aK_p$ или bK_o	$\delta = \frac{A_{и} - A_y}{A_y} 100\%$
$T=1/F$					
t_c					

τ					
U_m					

Таблица 2.4

τ_y	τ			τ_ϕ			τ_c		
	$a,$ дел.	K_p	$\tau = aK_p$	$a,$ дел.	K_p	$\tau_\phi = aK_p$	$a,$ дел.	K_p	$\tau_c = aK_p$

2.7. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы и назначение основных узлов универсального ЭЛО.
2. В каких режимах может работать генератор развертки, какова форма напряжения генератора в различных режимах?
3. Для чего нужны регулировки *Уровень синхронизации* и ее *полярность* (+/-) в осциллографе?
4. Перечислите основные характеристики и параметры ЭЛО.
5. Как производят калибровку ЭЛО?
6. Поясните суть метода калиброванных шкал.
7. Как измеряют длительность фронта и среза импульса, а также его длительность?
8. Для чего нужна линия задержки в канале Y осциллографа? В каком режиме работы осциллографа ее присутствие необходимо, а в каком необязательно?
9. Для чего используется режим растяжки развертки осциллографа? Как определяют длительность измеряемых временных интервалов в режиме растяжки?
10. Что такое обратный ход луча? Каким образом в универсальном осциллографе осуществляется гашение изображения обратного хода луча?
11. В чем состоит отличие двухлучевого осциллографа от однолучевого и каковы его достоинства?
12. Как правильно установить коэффициенты отклонения и развертки при осциллографических измерениях?
13. Поясните работу осциллографа в режимах внутренней и внешней синхронизации. Чем отличаются осциллограммы, сформированные в режимах внутренней и внешней синхронизации при наблюдении импульсов?
14. От чего зависит количество импульсов, наблюдаемых на экране осциллографа, при наблюдении периодического импульсного сигнала?
15. Почему подача напряжения на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ производится в симметричном виде?

16. Объясните почему может "бежать" изображение периодического сигнала на экране осциллографа при использовании автоколебательного режима генератора развертки. Сформулируйте условие неподвижности изображения.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Цель работы — изучение методов определения фазового сдвига и принципов действия приборов, применяемых при этих измерениях. Фазовый сдвиг измеряется следующими способами: способом эллипса; нулевым способом с помощью предварительно отградуированного фазовращателя; цифровым фазометром Ф2-16, работающим по принципу преобразования фазового сдвига во временной интервал.

3.1. Общие сведения

Понятие **фазы** связано с гармоническими (синусоидальными) колебаниями. Для напряжения $u(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ полной фазой является весь аргумент гармонической функции; величину φ называют начальной фазой. Для двух гармонических колебаний с равными частотами

$$u_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$u_2(t) = U_{2m} \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$$

вводят понятие разности фаз $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, которую обычно называют **фазовым сдвигом**.

Обычно принимают за начало отсчета момент времени, при котором начальная фаза первого (опорного) колебания равна 0. Тогда

$$U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin \omega t;$$

$$U_2(t) = U_{2m} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

где φ — фазовый сдвиг между этими напряжениями.

Для негармонических, в частности импульсных, колебаний понятие фазового сдвига заменяют понятием сдвига во времени. В этом случае измеряют время задержки. Для гармонических колебаний времени задержки t_3 соответствует фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi f t_3$.

3.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа

Фазовый сдвиг можно измерить непосредственно **по осциллограммам исследуемых напряжений**, наблюдая их одновременно на экране осциллографа (рис. 3.1). Очевидно, что

$$\varphi = 360^\circ a/b,$$

где a — расстояние в делениях между пересечениями осциллограммами нулевой линии; b — длительность периода, выраженная в делениях шкалы. Для этих измерений используют осциллограф с двухлучевой электронной трубкой или со встроенным электронным коммутатором. Погрешность измерения угла φ этим способом определяется погрешностями измерения длин отрезков a и b :

$$\Delta\varphi = \varphi \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2},$$

где $\Delta\varphi$ – погрешность измерения φ ; $\Delta a, \Delta b$ – абсолютные погрешности измерения отрезков a и b .

Можно считать максимально возможной погрешностью одно малое деление шкалы осциллографа $\Delta a = \Delta b = 1$.

$$\Delta\varphi = \varphi \sqrt{a^2 + b^2} / ab.$$

Здесь $\Delta\varphi, \varphi$ – в градусах; a, b – в малых делениях шкалы осциллографа.

При измерении фазового сдвига **способом эллипса** одно из исследуемых напряжений подают на вход Y , а другое – на вход X осциллографа. Осциллограф работает в XY -режиме (генератор линейной развертки отключен). При этом луч на экране описывает эллипс (рис. 3.2). Фазовый сдвиг определяют по формуле

$$\varphi = \arcsin(h/H) = \arcsin(l/L), \quad (3.1)$$

где l, h – отрезки, отсекаемые эллипсом по осям X и Y ; L, H – максимальные отклонения по осям X и Y .

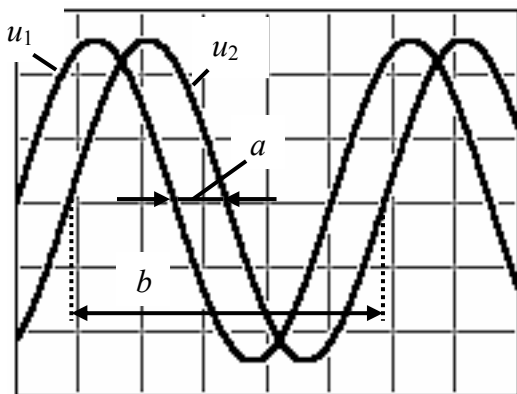


Рис. 3.1. Измерение фазового сдвига с помощью двухлучевого осциллографа

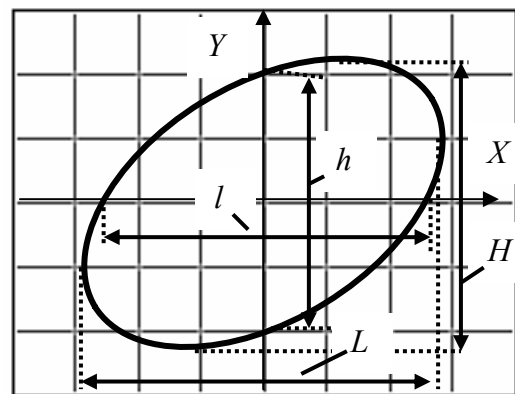


Рис. 3.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа в X - Y режиме

Погрешность измерения этим способом вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.2)$$

а погрешность Δh принимается равной одному малому делению шкалы осциллографа, H и h – размеры эллипса, выраженные в малых делениях шкалы осциллографа.

При измерениях этим способом необходимо учитывать фазовый сдвиг, вызываемый неидентичностью фазочастотных характеристик усилителей вертикального и горизонтального отклонений осциллографа, $\varphi = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_{\text{ух}}$, где $\varphi_{\text{ух}}$ – сдвиг фаз между каналами Y и X.

Измерение фазового сдвига нулевым (компенсационным) способом поясняет рис. 3.3. С помощью предварительно отградуированного фазовращателя ($\varphi_{\text{ф}} = \text{var}$) к фазе напряжения u_2 добавляют фазовый угол $\varphi_{\text{ф}}$, такой, чтобы

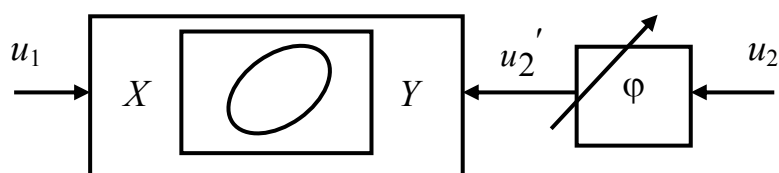


Рис. 3.3. Компенсационный способ измерения фазового сдвига

фазовый сдвиг между напряжениями u_1 и u_2' на входах индикатора равенства фаз (нуль-индикатор) был равен 0. При этом измеряемый фазовый сдвиг равен фазовому сдвигу, вносимому фазовращателем: $\varphi = \varphi_{\text{ф}}$. В качестве нуль-индикатора в данной работе используется осциллограф в XY – режиме. Равенству фаз напряжений u_1 и u_2' соответствует момент стягивания эллипса в прямую линию. Погрешность измерения угла φ этим способом складывается из погрешности градуировки фазовращателя, систематической погрешности $\varphi_{\text{ух}}$, погрешности определения момента равенства фаз. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте, так как $\varphi_{\text{ф}}$ зависит от частоты.

3.3. Цифровой фазометр Ф2-16

Основные технические характеристики

Диапазон рабочих частот, кГц 0,002...2000.
 Диапазон входных напряжений, В. 0,002...2.
 Пределы измерения разности фаз $\pm 180^\circ$; 0...360°.
 Основная погрешность измерения разности фаз (при относительной нестабильности частоты сигнала на более 10^{-4} за 10 мин)
 $\Delta\varphi \leq \pm (0,2 + 0,004\varphi + 0,05 A)$,

где φ – измеряемая разность фаз в градусах; A – отношение входных напряжений, дБ.

Входное сопротивление прибора более 1Мом, входная емкость 30 пФ.

Принцип действия. В фазометре Ф2-16 измеряемый фазовый сдвиг преобразуется во временной интервал (рис. 3.4, а и б). С помощью формирующих устройств (ФУ) из исследуемых напряжений u_1 и u_2 вырабатываются кратковременные импульсы в моменты перехода напряжений через 0 в

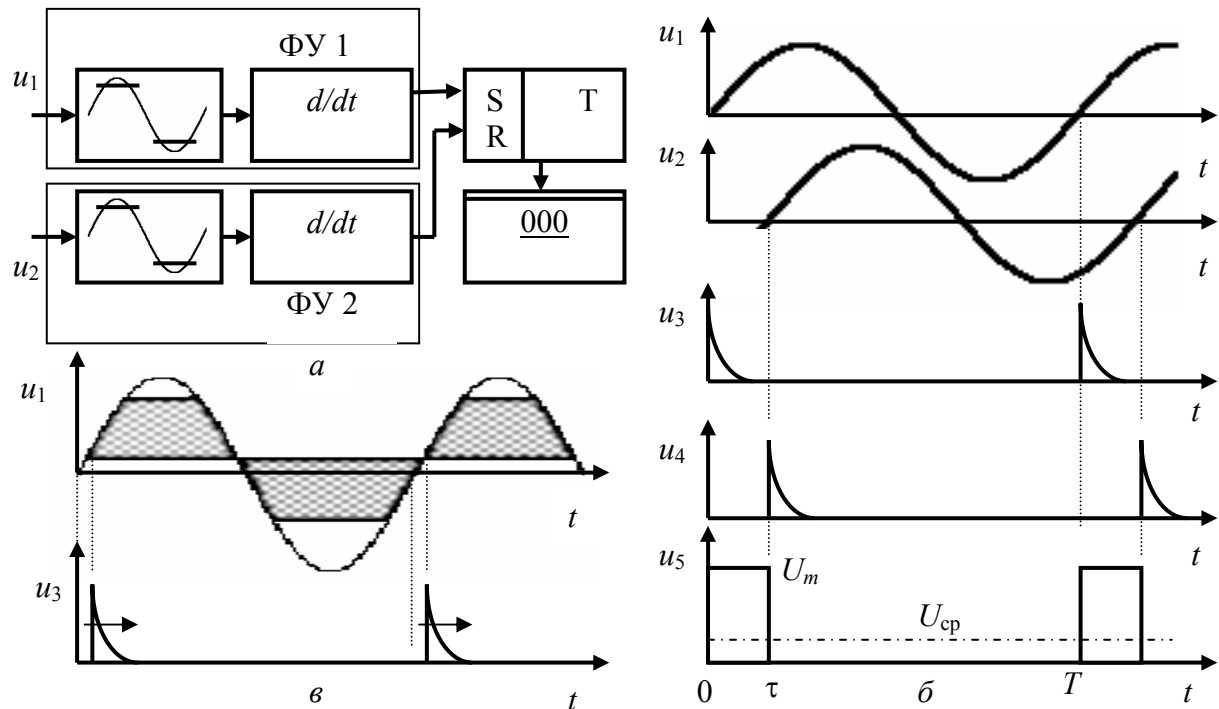


Рис. 3.4. Структурная схема и временные диаграммы фазометра с преобразованием фазового сдвига во временной интервал

сторону увеличения. Эти импульсы поступают на входы S и R триггера Т, и на его выходе формируются прямоугольные импульсы. Длительность импульсов триггера τ пропорциональна измеряемому сдвигу фаз: $\tau = \varphi T / 360^\circ$. Среднее значение напряжения на выходе триггера, пропорциональное измеряемому фазовому сдвигу

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} U_m dt = U_m \frac{\tau}{T} = U_m \frac{\varphi}{360^\circ},$$

измеряется встроенным цифровым вольтметром постоянного напряжения. При этом амплитуда импульсов U_m выбирается таким образом, чтобы показания вольтметра численно совпадали с фазовым сдвигом φ , выраженном в градусах.

При таком способе измерения фазового сдвига может возникнуть систематическая погрешность из-за несимметричного ограничения

исследуемых напряжений в ФУ. В этом случае напряжение на выходе ограничителя, например в ФУ1, будет иметь постоянную составляющую (рис. 3.4, в). Дифференцирующая цепь, входящая в ФУ, постоянную составляющую не пропускает, поэтому моменты перехода напряжения через нуль смещаются (показано на рис. 3.4, в стрелками). Изменение интервала τ приводит к погрешности измерения фазового сдвига.

Структурная схема. Фазометр Ф2-16 выполнен по двухканальной схеме; опорный канал (ОК) и измерительный канал (ИК) идентичны (рис. 3.5). Для устранения погрешности из-за несимметричного ограничения в фазометре используются два триггера. Усилители ограничители выполнены по двухтактной схеме, поэтому их выходные напряжения u_3, u_4 и u_5, u_6 противофазны (рис. 3.6).

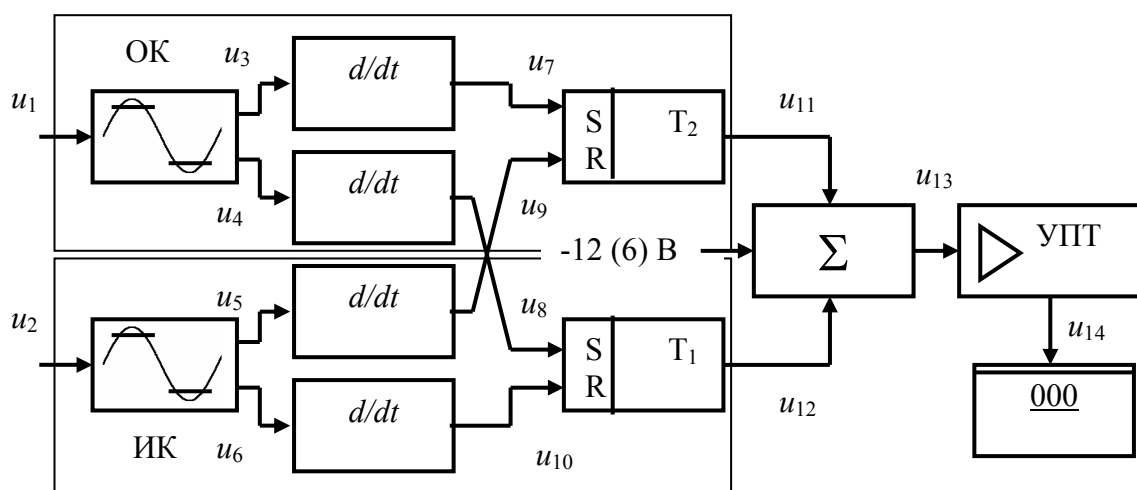


Рис. 3.5. Структурная схема фазометра Ф2-16

Роль дифференцирующих цепочек выполняют дискриминаторы уровня. Дискриминаторы ОК срабатывают при прохождении через 0 напряжений u_3, u_4 в сторону увеличения, а дискриминаторы ИК срабатывают при прохождении через 0 напряжений u_5, u_6 в сторону уменьшения. Триггер Т2 переключается положительным импульсом u_7 и отрицательным импульсом u_9 . Триггер Т2 переключается соответственно импульсами u_8 и u_{10} , которые сдвинуты на полпериода относительно u_7 и u_9 . Прямоугольные импульсы u_{11} и u_{12} амплитудой 6 В с Т1 и Т2 складываются в сумматоре, образуя u_{13} . Туда же подается напряжение смещения – 12 В. Усилитель постоянного тока (УПТ) выделяет постоянную составляющую и изменяет ее полярность, после чего напряжение измеряется цифровым вольтметром. Если в первом канале, например, ограничение несимметричное, то импульсы u_7 и u_8 сдвинуты, как показано стрелками на рис. 3.6. Импульс u_{11} станет короче, а импульс u_{12} – длиннее, поэтому результирующая постоянная составляющая останется без изменения.

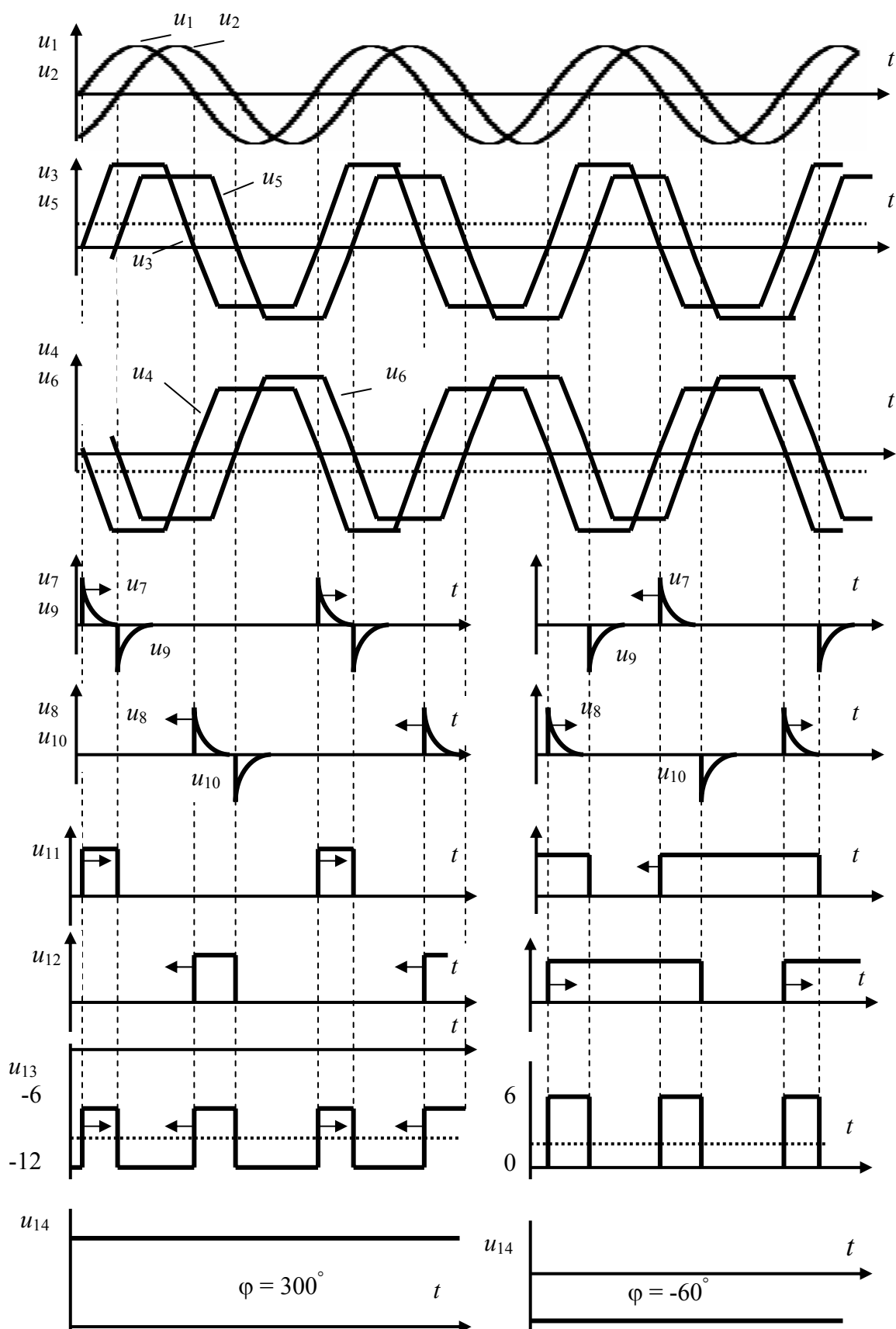


Рис. 3.6. Временные диаграммы, поясняющие работу фазометра Ф2-16

В фазометре Ф2-16 предусмотрен режим измерения сдвига фаз $\pm 180^\circ$. В этом режиме с помощью переключателя напряжения u_7 и u_8 меняются местами, на сумматор подается напряжение смещения не -12, а -6 В. Графики напряжений для этого режима показаны на рис. 3.6 справа.

3.4 Описание лабораторного макета

В лабораторном макете смонтированы регулируемый фазовращатель, фазосдвигающий Т-мост и набор из трех линий задержки.

Фазовращатель. Схема используемого фазовращателя приведена на рис. 3.7, а. Векторная диаграмма (рис. 3.7, б) поясняет его работу. Фазовый угол между напряжениями на емкости и на резисторе, как известно, равен 90° . Сумма этих напряжений в данной схеме при любых значениях R и C остается постоянной, равной входному напряжению. Выходное напряжение снимается между точками в и г фазовращателя. Из диаграммы видно, что при одновременном изменении сопротивлений резисторов R от 0 до ∞ фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями меняется от 0 до 180° . Амплитуда выходного напряжения остается при этом постоянной, равной амплитуде входного. Фазовый сдвиг определяется формулой $\varphi_\Phi = 2 \arctg 2\pi fRC$.

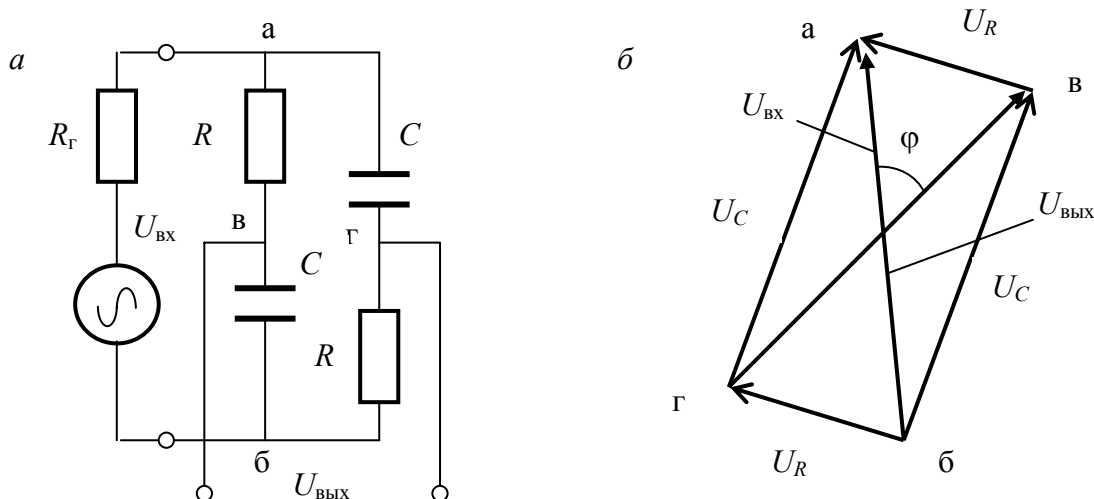


Рис. 3.7. Схема и векторная диаграмма напряжений фазовращателя

В реальной схеме сопротивления резисторов не могут меняться от 0 до бесконечности, поэтому фазовый сдвиг в фазовращателе будет изменяться в пределах $0^\circ < \varphi_\Phi < 180^\circ$.

Т-мост. Схема фазосдвигающего Т-моста приведена на рис. 3.8. Нагрузкой его в данной работе является осциллограф, входное

сопротивление которого много больше выходного сопротивления Т-моста. В этом случае выражение для фазового сдвига, создаваемого Т-мостом, имеет вид

$$\varphi_T = -\arctg \frac{1}{2\pi fRC} \quad (3.3)$$

Линии задержки. Простейшая линия задержки представляет собой ряд каскадно включенных LC -звеньев (рис. 3.9). Каждое звено дает временную задержку $t_3 = \sqrt{LC}$; общее время задержки линии из n звеньев $t_3 = n\sqrt{LC}$. Волновое сопротивление такой линии $\rho = \sqrt{L/C}$. Для неискаженной передачи сигналов линия задержки должна быть нагружена на сопротивление $R_H = \rho$, а полоса пропускания ее должна быть больше ширины спектра сигнала. Фазовый сдвиг, создаваемый линией задержки, может быть вычислен по формуле $\varphi_L = 360^\circ f t_3$.

ФЧХ линии задержки представляет собой прямую линию с наклоном, определяемым временем задержки t_3 .

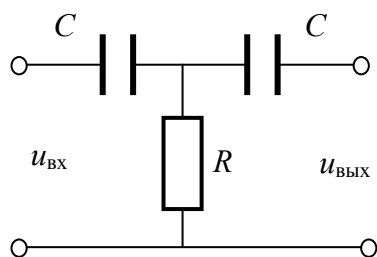


Рис. 3.8. Схема Т-моста

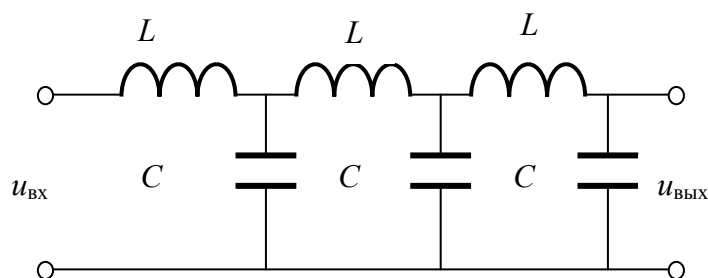


Рис. 3.9. Схема линии задержки


3.5. Задание и указания к выполнению работы

3.5.1. Измерение сдвига фаз между каналами Y1и X осциллографа С1-96 способом эллипса

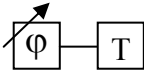
Подайте напряжения с разъемов макета Вых1 и Вых2 на входы Y1 и СИНХР 1:1 осциллографа. На осциллографе установите следующие положения регулировок: ВОЛЬТ/ДЕЛ – 0,2; РАСТЯЖКА х5 (кнопка выдвинута); нажмите кнопки УСИЛ X, АВТ. На генераторе установите следующие положения регулировок: МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – 10^3 ; НАПРЯЖЕНИЕ – ФИКСИР; ОСЛАБЛЕНИЕ dB – 20; ВНУТР. НАГРУЗКА 600Ω – в верхнем положении. Измерения проведите на указанных в табл. 3.1 частотах. При этом способе измерения нужно точно совместить центр эллипса с центром экрана осциллографа. По формулам (3.1) и (3.2)

рассчитайте фазовый сдвиг φ_{YX} и погрешность $\Delta\varphi_{YX}$. Данные измерений и расчетов занесите в табл. 3.1. Постройте график зависимости $\varphi_{YX}(f)$.

3.5.2. Градуировка фазовращателя лабораторного макета с помощью фазометра Ф2-16

Определите зависимость фазового сдвига φ_ϕ от угла поворота ручки потенциометра лабораторного макета на частотах 12, 15, 18, 20, 25 и 30 кГц. Одновременно наблюдайте на экране осциллографа С1-96 исходное и сдвинутое по фазе напряжения. Для этого подайте на вход фазовращателя  напряжение около 2 В соответствующей частоты с генератора ГЗ-107. Соедините входы 1 каналов А и В фазометра с гнездами ОПОРН и СИГНАЛ макета. Входы Y1 и Y2 осциллографа С1-96 соедините с разъемами ВЫХ1 и ВЫХ2 макета, переключатель рода работ установите в положение ϕ . На фазометре нажмите кнопки $\pm 180^\circ$; $[f]kHz$ 20–200. На осциллографе нажмите кнопку СИНХРОНИЗАЦИЯ-Y1. Проведите измерения фазового сдвига для всех делений шкалы потенциометра. Результаты занесите в табл. 3.2. Постройте на одном графике градуировочные кривые фазовращателя $\varphi_\phi(\alpha)$ для указанных частот.

3.5.3. Измерение фазового сдвига Т–моста нулевым способом

Переключатель рода работ макета установите в положение . Соедините разъемы макета ВЫХ1 и ВЫХ2 с входом осциллографа СИНХР1:1 и УСИЛИТЕЛЬ Y1. На осциллографе нажмите кнопки УСИЛИТЕЛЬ X, РАСТЯЖКА x5 (кнопка выдвинута). Регулировкой фазовращателя добейтесь стягивания изображения эллипса в прямую линию. При этом $\varphi_T = \varphi_\phi$. Запишите значения α , дел. в табл. 3.3. Пользуясь градуировочными кривыми фазовращателя, определите фазовый сдвиг Т–моста на указанных в табл. 3.3 частотах, запишите значения $\varphi_{T\text{ изм.}}$. Рассчитайте фазочастотную характеристику Т–моста по формуле (3.3). Учтите, что $C=820$ пФ, $R=11$ кОм. Результаты измерений и расчета занесите в табл. 3.3. Постройте экспериментальную и расчетную ФЧХ Т–моста и сравните их.

3.5.4. Измерение фазочастотных характеристик трех линий задержки с помощью фазометра Ф2-16

Фазометр используется в режиме 0–360°. Измерения проведите в диапазоне частот от 20 до 200 кГц. Переключатель рода работ макета установите в положение ЛЗ. На фазометре Ф2-16 нажмите кнопки 0–360°;

$[f]kHz$ 20–200. Результаты измерений занесите в табл. 3.4 и постройте графики зависимостей $\varphi_{\text{л}}(f)$. По данным табл. 3.4 вычислите среднее время задержки для каждой линии по формуле $t_3 = \Delta\varphi / 360^\circ \Delta f$, здесь $\Delta\varphi$ – приращение фазы при изменении частоты на Δf . Сравните найденные значения t_3 с указанными на макете.

3.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать: упрощенную и полную структурные схемы фазометра Ф2-16, схему измерения фазового сдвига Т-моста и линии задержки, таблицы и графики по всем пунктам работы.

3.7. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 3.1

Измеряемая величина	f, кГц						
	5	10	15	20	50	100	200
I, дел.							
L, дел.							
Φ_{YX}							
$\Delta\Phi_{YX}$							

Таблица 3.2

α , дел.	f, кГц					
	12	15	18	20	25	30
1						
2						
⋮						
11						

Таблица 3.3

f, кГц	12	15	18	20	25	30
α , дел.						
$\Phi_{\text{Т изм}}$						
$\Phi_{\text{Т расч}}$						

Таблица 3.4

Ф л	f , кГц									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Ф л1										
Ф л2										
Ф л3										

3.8. Контрольные вопросы

1. Дайте определение фазового сдвига. Для каких сигналов вводится это понятие?
2. Как измерить фазовый сдвиг по осциллограммам исследуемых напряжений с помощью двухлучевого осциллографа? Чем определяются погрешность этого способа?
3. Как измерить фазовый сдвиг способом эллипса? Чем определяется погрешность этого способа?
4. Поясните методику измерения фазового сдвига нулевым способом.
5. Как устранить погрешность, вызванную неидентичностью фазовых характеристик X и Y каналов осциллографа?
6. Поясните принцип действия фазометра с преобразованием измеряемого фазового сдвига во временной интервал.
7. Назовите технические характеристики фазометра Ф2-16.
8. По структурной схеме фазометра Ф2-16 поясните принцип его работы. Используйте графики (рис. 3.6).
9. Как устраняется погрешность в фазометре Ф2-16?
10. Нарисуйте схему и векторную диаграмму симметричного RC-фазовращателя, поясните его работу.
11. Сохраняется ли градуировка симметричного RC-фазовращателя при переходе на другую частоту?
12. Как определить по ФЧХ среднее время задержки?
13. Каковы условия неискаженной передачи сигналов линией задержки?
14. От чего зависит фазовый сдвиг в линии задержки?

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ

Цель работы —изучение методов измерения параметров линейных компонентов, а также основных технических характеристик, устройства и применения измерителя иммитансных параметров Е7-15.

Программа работы включает измерение параметров резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Предусмотрена статистическая обработка результатов измерений и расчет погрешностей измерений.

4.1. Метод измерения иммитансных параметров линейных компонентов

К **иммитансным параметрам** электро- и радиокомпонентов электрических цепей относятся: сопротивление R или проводимость $G=1/R$, индуктивность L , емкость C . Кроме них иногда требуется измерять также относительные параметры: фактор потерь D (тангенс угла потерь) или добротность $Q=1/D$.

Полное сопротивление $Z = R + jX$ содержит в общем случае активную R и реактивную X компоненты (рис. 4.1). Если реактивное сопротивление носит индуктивный характер, то $X = \omega L = 2\pi fL$, а если емкостной, то $X = \frac{-1}{\omega C} = \frac{-1}{2\pi fC}$, ω - круговая частота, а f - частота, на которых проводят измерения. При индуктивном характере сопротивления в последовательной эквивалентной схеме (рис. 1) $Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{D}$, в случае емкостного характера сопротивления $D = \omega CR = \frac{1}{Q}$.

Полная проводимость $Y = G + jB$ также в общем случае состоит из активной G и реактивной B компонент (рис. 4.2). Для реактивной проводимости емкостного характера $B = \omega C = 2\pi fC$, а при индуктивном характере $B = \frac{-1}{\omega L} = \frac{-1}{2\pi fL}$. В параллельной схеме (рис. 2) $D = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{Q}$.

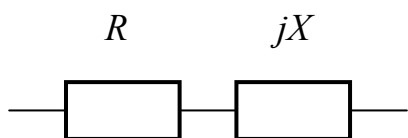


Рис. 4.1. Полное сопротивление

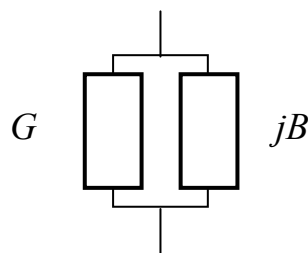


Рис. 4.2. Полная проводимость

Измеритель иммитанса Е7-15 предназначен для измерения иммитансных параметров электрорадиокомпонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности.

Структурная схема прибора приведена на рис. 4.3. Напряжение рабочей частоты генератора подается на измеряемый объект, подключаемый к преобразователю $Y \rightarrow U_T, U_H$. Преобразователь формирует два напряжения, одно из которых U_T пропорционально току, протекающему через измеряемый объект, а другое U_H – напряжению на нем. Отношение комплексных амплитуд этих напряжений равно полной проводимости Y или полному сопротивлению Z .

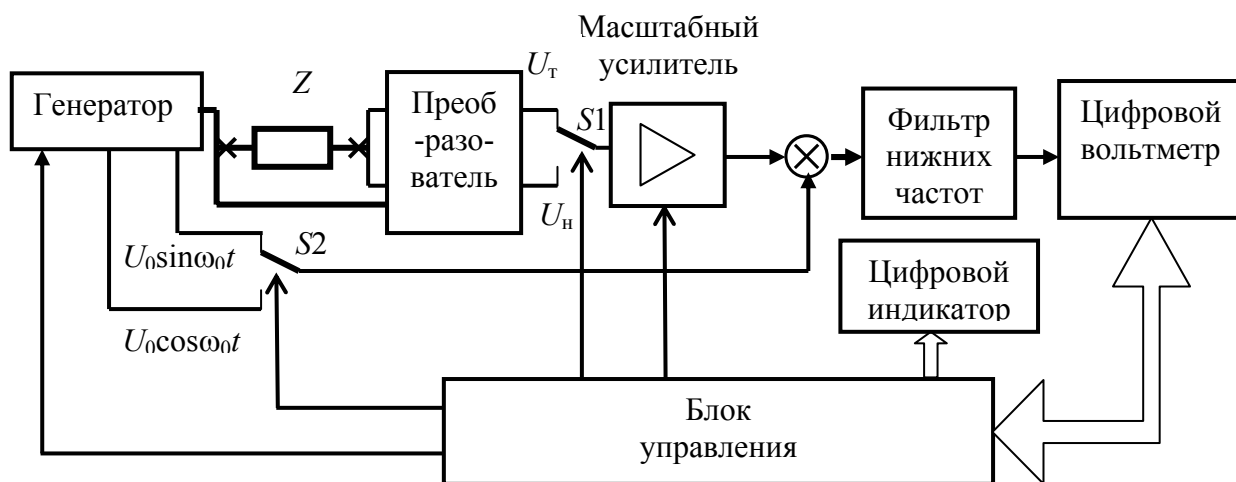


Рис. 4.3. Структурная схема измерителя иммитанса Е7-15

Измерение отношения напряжений проводится аппаратно-программным логометром. Его аппаратная часть состоит из двух коммутаторов $S1$ и $S2$, масштабного усилителя, перемножителя, фильтра нижних частот и цифрового вольтметра, использующего метод двойного интегрирования. Итогом работы программной части логометра является расчет отношения напряжений.

На рис. 4.4 изображены векторы \mathcal{U}_T и \mathcal{U}_H и опорные вспомогательные напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$.

Проекции векторов \mathcal{U}_T и \mathcal{U}_H на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$ выделяются с помощью перемножителя и фильтра нижних частот, после чего измеряются в некотором произвольном масштабе цифровым вольтметром. Полная проводимость определяется выражением

$$Y = G + jB = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{U}} = k_Y \frac{\mathcal{U}_T}{\mathcal{U}_H} = k_Y \frac{\mathcal{U}_x}{\mathcal{U}_0} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}, \quad (4.1)$$

где G - активная проводимость, B - реактивная проводимость, \mathcal{P} и \mathcal{U} - комплексные амплитуды тока и напряжения на исследуемом элементе, k_Y -

известный коэффициент, имеющий размерность проводимости, \mathcal{U}_x - числитель измеряемого отношения, \mathcal{U}_0 - знаменатель измеряемого отношения, E, F, S, T проекции векторов \mathcal{U}_T и \mathcal{U}_H на опорное напряжение $U_{оп}$ и $jU_{оп}$. Из (4.1) следует

$$G = k_Y \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, B = k_Y \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (4.2)$$

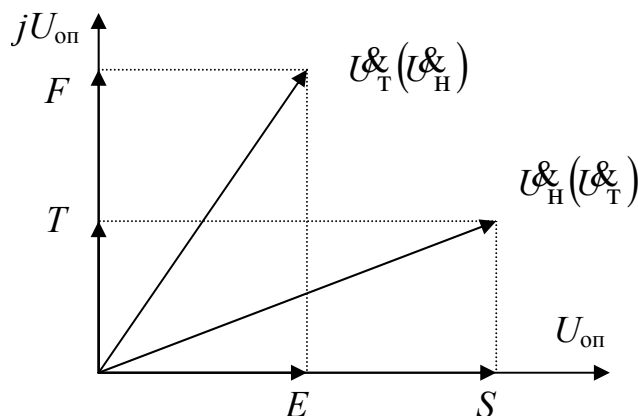


Рис. 4.4. Векторная диаграмма напряжений

Аналогичные соотношения имеют место для вычисления полного сопротивления

$$Z = R + jX = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{I}} = k_Z \frac{\mathcal{U}_H}{\mathcal{U}_T} = k_Z \frac{\mathcal{U}_x}{\mathcal{U}_0} = k_Z \frac{E + jF}{S + jT},$$

где R - активное сопротивление, X - реактивное сопротивление, вычисляемые по формулам

$$R = k_Z \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, X = k_Z \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (4.3)$$

При измерении высокоомных объектов (1-4 пределы измерения), когда генератор сигнала является источником напряжения, предпочтительнее осуществлять измерения в виде составляющих полной проводимости ($\mathcal{U}_x = \mathcal{U}_T$, $\mathcal{U}_0 = \mathcal{U}_H$).

В случае измерения низкоомных объектов источник сигнала работает как генератор тока (5-8 пределы измерения) и более удобным является измерение в форме составляющих полного сопротивления ($\mathcal{U}_x = \mathcal{U}_H$, $\mathcal{U}_0 = \mathcal{U}_T$). Требуемая форма иммитанса достигается пересчетом из первичной формы (G, B или R, X) и осуществляется контроллером. Расширение пределов измерения достигается за счет изменения

коэффициента передачи усилительного тракта логометра при измерении составляющей U_x в 10, 100 и 1000 раз.

С выхода усилителя гармоническое напряжение $U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$, пропорциональное току U_T или напряжению U_H в зависимости от состояния переключателя $S1$, поступает на перемножитель. На второй вход перемножителя поступает опорное напряжение с генератора: $U_0 \sin(\omega_0 t)$ либо $U_0 \cos(\omega_0 t)$ в зависимости от состояния переключателя $S2$. При этом на выходе перемножителя получают соответственно напряжения

$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \cdot U_0 \cos(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \sin \varphi + \frac{U_0}{2} U_m \sin(2\omega_0 t + \varphi);$$

$$U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \cdot U_0 \sin(\omega_0 t) = \frac{U_0}{2} U_m \cos \varphi - \frac{U_0}{2} U_m \cos(2\omega_0 t + \varphi).$$

Высокочастотные составляющие с удвоенной частотой подавляются фильтром нижних частот. Постоянные составляющие напряжения, пропорциональные $U_m \cos \varphi$ и $U_m \sin \varphi$ и называемые квадратурными компонентами, измеряются поочередно цифровым вольтметром. Косинусные составляющие позволяют определить компоненты E и S , а синусные компоненты F и T (рис. 3). Измеренные значения вводятся в блок управления, после чего производится вычисления по формулам (2) или (3).

4.2. Краткое описание характеристик измерителя иммитанса Е7-15

Измеритель иммитанса Е7-15. Прибор предназначен для автоматического измерения параметров конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов на частотах 100 Гц и 1 кГц. Основные измеряемые величины и пределы измерений даны в табл. 4.1 и 4.2.

Пределы допускаемого значения основной погрешности измерения иммитансных параметров на частотах 0.1 и 1 kHz должны быть равны значениям, указанным в табл. 4.3-4.10. C' , L' , R' , G' максимальные значения измеряемых на каждом из пределов величин (табл. 4.1 и 4.2).

Таблица 4.1

Предел измерения	Емкость C на частотах, kHz		Проводимость G
	0.1	1	
1	1-1600 pF	0.1-160.0 pF	1-50 nS
2	0.01-16.00 nF	1-1600 pF	0.01-1.00 μ S
3	0.1-160.0 nF	0.01-16.00 nF	0.1-10.0 μ S
4	1-1600 nF	0.1-160.0 nF	1-100 μ S
5	1.600-16.00 μ F	160.0-1600 nF	-
6	16.00-160.0 μ F	1.600-16.00 μ F	-

7	160.0-1600 μF	1.600-16.00 μF	-
8	1.600-20.00 mF	160.0-1600 μF	-

Таблица 4.2

Предел измерения	Индуктивность, L на частотах, kHz		Сопротивление, R
	0.1	1	
1	1.600-1600 kH	160.0-1600 H	1.000-20.00 M Ω
2	160.0-1600 H	16.00-160.0 H	100.0-1000 k Ω
3	16.00-160.0 H	1.600-16.00 H	10.00-100.0 k Ω
4	1.600-16.00 H	160.0-1600 mH	1.000-10.00 k Ω
5	1-1600 mH	0.1-160.0 mH	1-1000 Ω
6	0.1-160.0 mH	0.01-16.00 mH	0.1-100.0 Ω
7	0.01-16.00 mH	1-1600 μH	0.01-10.00 Ω
8	1-1600 mH	0.1-160.0 μH	1-1000 m Ω

Таблица 4.3

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
C	1	$[2.5(1 + D)C + 1.3C']10^{-3}$
	2-4	$[2.5(1 + D)C + 0.63C']10^{-3}$
	5-7	$\left[2.5(1 + D) + 6.3\frac{C}{C'}\right]10^{-3}C$
	8	$\left[2.5(1 + D) + 13\frac{C}{C'}\right]10^{-3}C$

Таблица 4.4

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
L	1	$\left[2.5(1 + D) + 13\frac{L}{L'}\right]10^{-3}L$
	2-4	$\left[2.5(1 + D) + 6.3\frac{L}{L'}\right]10^{-3}L$
	5-7	$[2.5(1 + D)L + 0.63L']10^{-3}$
	8	$[2.5(1 + D)L + 1.3L']10^{-3}$

Таблица 4.5

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
R	1	$\left[2.5(1 + Q) + 40\frac{R}{R'}\right]10^{-3}R$
	2-4	$\left[2.5(1 + Q) + 10\frac{R}{R'}\right]10^{-3}R$

	5-7	$[2.5(1+Q)R + R']10^{-3}$
	8	$[2.5(1+Q)R + 2R']10^{-3}$

Таблица 4.6

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
G	1	$[2.5(1+Q)G + 40G']10^{-3}$
	2-4	$[2.5(1+Q)G + 10G']10^{-3}$

Таблица 4.7

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
D (для емкостей)	1	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 2 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}(1+D)$
	2-4	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 1 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}(1+D)$
	5-7	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 10 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'}(1+D)$
	8	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 20 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'}(1+D)$

Таблица 4.8

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
D (для индуктивностей)	1	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 20 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'}(1+D)$
	2-4	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 10 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'}(1+D)$
	5-7	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 1 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L}(1+D)$
	8	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+D^2) + 2 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L}(1+D)$

Таблица 4.9

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
Q (для емкостей)	1	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 1.3 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}Q(1+Q)$
	2-4	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 0.63 \cdot 10^{-3} \frac{C'}{C}Q(1+Q)$
	5-7	$2.5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 6.3 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'}Q(1+Q)$

	8	$2.5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 13 \cdot 10^{-3} \frac{C}{C'} Q(1 + Q)$
--	---	---

Таблица 4.10

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
Q (для индуктив- ностей)	1	$2.5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 13 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'} Q(1 + Q)$
	2-4	$2.5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 6.3 \cdot 10^{-3} \frac{L}{L'} Q(1 + Q)$
	5-7	$2.5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 0.63 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1 + Q)$
	8	$2.5 \cdot 10^{-3}(1 + Q^2) + 1.3 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1 + Q)$

4.3. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет используют для измерений прибором Е7-15. Он содержит: 30 резисторов, любой из которых с помощью переключателей S1 ...S3 можно подключить к гнездам R_х; 30 конденсаторов, подключаемых теми же переключателями к гнездам C_х; конденсатор с диэлектриком из сегнетокерамики, соединенный с гнездами СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР, а также катушку индуктивности с сердечником из феррита, подключенную к гнездам КАТУШКА С ФЕРРОМАГН. СЕРДЕЧНИКОМ.

4.4. Задание и указания к выполнению работы

Проведение измерений. Прибор Е7-15 может измерять активные и реактивные параметры иммитансов измеряемых объектов по параллельной (на 1-4 пределах измерения) или последовательной (на 5-8 пределах измерения) эквивалентной схеме. Относительные параметры измеряются в форме фактора потерь D или добротности Q .

Включите прибор и перед началом измерений установите при помощи кнопок на передней панели прибора следующие режимы: **ПАРАМЕТР R/G**, **ПРЕДЕЛ А** (автоматический выбор), **ЧАСТ 1 kHz**, **СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ.**

Для проведения измерений достаточно подключить измеряемый объект к зажимам и установить нужный режим измерения. Нажатием кнопки **ПАРАМЕТР** пользователь может установить прибор в режим измерения реактивной составляющей иммитанса (L или C), активной (R или G) или в режим измерения относительного параметра (D или Q).

Кнопкой **ЧАСТ** установить требуемую частоту 100 Hz или 1 kHz.

При измерении емкости электролитических конденсаторов нажатием кнопки **СМЕЩЕНИЕ** можно подать поляризующее напряжение плюс 4.8 В (со стороны выводов I, U).

При нажатии кнопки **ПРЕДЕЛ** прибор производит автоматическое переключение пределов с 1 по 8 и установку прибора в режим автоматического выбора предела измерения. Номер установленного предела и режим автоматического выбора индицируется при этом на дисплее прибора (1....8, A). Для установки требуемого предела измерения необходимо отпустить кнопку **ПРЕДЕЛ** в тот момент времени, в который на дисплее высвечивается требуемый номер предела (или режим автоматического выбора предела).

При необходимости узнать номер установленного предела нужно нажать кнопку **ПРЕДЕЛ**, считать номер предела и отпустить кнопку до момента изменения предела (около 1.5 с). Нахождение прибора в режиме ручной установки предела индицируется зажиганием светодиодного указателя **ФИКС**.

Если установленный вручную предел приводит к перегрузке измерительной цепи, на дисплее прибора появляется символ **ПРГР**.

4.4.1. Измерение сопротивлений резисторов прибором Е7-15

Подготовка прибора к работе. Перед измерениями включите прибор. Переключатели **ПАРАМЕТР** установите в положение **RG**, **ЧАСТ** 1 kHz, **ПРЕДЕЛ** A, **СМЕЩЕНИЕ** ВЫКЛ. Одно из гнезд R_x лабораторного макета с помощью соединительного кабеля подключите к гнездам I, U прибора; другой – к гнездам I', U'.

Измерение сопротивлений резисторов. Изменяя положения переключателей, поочередно измерьте сопротивления 30 резисторов, запишите результаты измерений. Рассчитайте статистические параметры, характеризующие разброс их значений: среднее значение сопротивления \bar{R} , среднее значение отклонения $\overline{\Delta R}$ от номинального значения $R_{\text{ном}}$, указанного на резисторе, и выборочную дисперсию σ^2 :

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i \quad ; \quad \overline{\Delta R} = \bar{R} - R_{\text{ном}} \quad ; \quad \sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2 ,$$

где $m=30$ – объем выборки; R_i – измеренное значение; $R_{\text{ном}}=12$ кОм.

Значения $\Delta R / R_{\text{ном}}$ лежат в интервале $\delta_1 \leq \Delta R / R_{\text{ном}} \leq \delta_2$ (доверительный интервал) с доверительной вероятностью γ . Для определения δ_1 и δ_2 необходимо знать закон распределения случайной величины $\Delta R / R_{\text{ном}}$. При малом объеме выборки m он соответствует распределению Стьюдента, а при $m \rightarrow \infty$ асимптотически приближается к нормальному.

Определите границы доверительного интервала, пользуясь коэффициентом Стьюдента $t(\gamma, m)$, представляющим собой табулированное значение интеграла Стьюдента:

$$\delta_{1,2} = \left[\overline{\Delta R} \pm t(\gamma, m) \sqrt{\sigma^2 / m} \right] 100 / R_{\text{ном}}, \%$$

Задайтесь $\gamma=0,95$. Тогда при $m=30$ значение $t(0,95;30)=2,042$. Результаты измерений и расчетов оформите в виде табл. 4.11.

4.4.2. Измерение емкостей конденсаторов прибором Е7-15

Переключатели **ПАРАМЕТР** установите в положение **LC**, **ЧАСТ** 1 kHz, **ПРЕДЕЛ** А, **СМЕЩЕНИЕ** ВЫКЛ. Одно из гнезд C_x с помощью соединительного кабеля подключите к гнездам I, U прибора, другое – к I', U'.

Изменяя положения переключателей, поочередно измерьте емкости 30 конденсаторов. Произведите статистическую обработку результатов измерений по методике п. 4.4.1. Значения $C_{\text{ном}}=1200$ пФ. Результаты измерений расчетов оформите в виде табл. 4.12.

4.4.3. Измерение емкости и фактора потерь сегнетокерамического конденсатора

Соедините гнезда I, U и I', U' с гнездами **СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР** лабораторного макета. Переключатели **ПАРАМЕТР** установите в положение **LC**, **ЧАСТ** 1 kHz, **ПРЕДЕЛ** А, **СМЕЩЕНИЕ** ВЫКЛ. Запишите измеренное значение емкости конденсатора, схему измерения (последовательная или параллельная - в левом верхнем углу прибора Е7-15). Спишите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1.5 с) кнопку **ПРЕДЕЛ** и спишите показания индикатора (цифра в пределах 1-8). При длительном нажатии клавиши **ПРЕДЕЛ** происходит последовательное переключение предела измерения и для его восстановления нужно удерживать клавишу **ПРЕДЕЛ** до появления символа А. После этого нужный предел измерения будет установлен автоматически. Для проверки установленного предела вновь на короткий промежуток времени нажмите клавишу **ПРЕДЕЛ** и считайте установленное значение предела.

Переключите клавишу **ПАРАМЕТР** в положение **DQ**. Измерьте значение фактора потерь и спишите значение предела измерения.

Повторите измерения емкости и фактора потерь конденсатора на частоте 100 Hz, для чего воспользуйтесь клавишей **ЧАСТ**. Не забудьте при этом записывать номер предела, на котором проводилось измерение и вид схемы измерения: последовательная или параллельная - в левом верхнем углу прибора Е7-15. Рассчитайте пределы допускаемого значения погрешности

измерения емкости и фактора потерь на двух частотах. Для этого воспользуйтесь техническими характеристиками прибора, приведенными в п. 4.2. По измеренным значениям емкости и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления или проводимости потерь конденсатора для двух частот. Для этого воспользуйтесь материалами п. 4.1.

При записи результатов измерений и их погрешностей необходимо, чтобы их низшие разряды были одинаковы, а в числовых значениях показателей точности было не более двух значащих цифр. При этом, если значение погрешности начинается с цифр 1 или 2, то округление погрешности производится до двух значащих цифр, а в противном случае – до одной цифры.

Результаты сведите в табл. 4.13.

4.4.4. Измерение индуктивности и фактора потерь катушки с ферромагнитным сердечником

Соедините гнезда I, U и к I', U' прибора с гнездами КАТУШКА С ФЕРРОМАГН. СЕРДЕЧНИКОМ лабораторного макета. Переключатели ПАРАМЕТР установите в положение LC, ЧАСТ 1 kHz, ПРЕДЕЛ А, СМЕЩЕНИЕ ВЫКЛ. Запишите измеренное значение индуктивности катушки, схему измерения (последовательная или параллельная - в левом верхнем углу прибора Е7-15). Спишите также предел, на котором проводилось измерение. Для этого нажмите на короткий промежуток времени (менее 1.5 с) кнопку ПРЕДЕЛ и спишите показания индикатора (цифра в пределах 1-8).

Переключите клавишу ПАРАМЕТР в положение DQ. Измерьте значение фактора потерь и спишите значение предела измерения.

Повторите измерения индуктивности и фактора потерь катушки на частоте 100 Hz, для чего воспользуйтесь клавишей ЧАСТ. Не забудьте при этом записывать номер предела, на котором проводилось измерение и вид схемы измерения: последовательная или параллельная - в левом верхнем углу прибора Е7-15. Рассчитайте пределы допускаемого значения погрешности измерения индуктивности и фактора потерь на двух частотах. Для этого воспользуйтесь техническими характеристиками прибора, приведенными в п. 4.2. По измеренным значениям индуктивности и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления потерь катушки, ее добротность. Воспользуйтесь для этого материалами п. 4.1. Определите также погрешность определения добротности для двух частот по формуле $\Delta Q = \Delta D / D^2$.

Результаты сведите в табл. 4.14.

4.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему прибора, векторные диаграммы и основные расчетные соотношения; результаты измерений и расчетов по всем пунктам работы, оформленные в виде таблиц; краткие выводы и анализ полученных результатов.

4.6. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 4.11

i	1	2	...	30
R_i , кОм			...	
$\bar{R} =$	$\Delta \bar{R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %

Таблица 4.12

i	1	2	...	30
C_i , кОм				
$\bar{C} =$	$\Delta \bar{C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %

Таблица 4.13

Частота	C	Посл/ парал	Предел	D	C'	ΔC	ΔD	R/G
1 кГц								
100 Гц								

Таблица 4.14

Частота	L	Посл/ парал	Предел	D	L'	ΔL	ΔD	R	Q	ΔQ
1 кГц										
100 Гц										

4.7. Контрольные вопросы

1. Перечислите иммитансные параметры компонентов цепей и приведите соответствующие эквивалентные схемы.
2. Поясните назначение элементов структурной схемы измерителя иммитанса Е7-15.
3. Поясните принцип работы измерителя иммитанса Е7-15.
4. Какими параметрами оценивают разброс значений при измерении большой партии однотипных элементов? Поясните смысл и способ определения этих параметров.

5. Как определяются погрешности измерения емкости конденсатора и фактора потерь?
6. Как определяются погрешности измерения индуктивности катушки и ее добротности?
7. Как формируются и измеряются квадратурные компоненты напряжений?
8. Какую роль выполняет фильтр нижних частот?
9. В чем состоит разница при измерении параметров высокоомных и низкоомных объектов?
10. Какие функции выполняет блок управления?

5. ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цель работы – изучение устройства и методов управления измерительными генераторами сигналов. Исследуются генераторы гармонических сигналов – низкочастотный (НЧ), высокочастотный (ВЧ) и генератор импульсов прямоугольной формы. Изучаются структурные схемы и назначение органов управления генераторов, методики контроля их параметров (поверки).

В состав лабораторной установки входят исследуемые генераторы: ГЗ-112 (НЧ), Г4-102 (ВЧ), Г5-54 (генератор импульсов). При поверке используют образцовые приборы: частотомер ЧЗ-64, двухлучевой осциллограф С1-96, универсальный цифровой вольтметр В7-27. Для согласования сопротивлений генератора и измерительных приборов применяется выносная нагрузка со стандартным активным сопротивлением.

5.1. Принципы построения измерительных генераторов

Измерительные генераторы – источники образцовых (тестовых) сигналов. Они отличаются возможностью установки формы и параметров выходных сигналов с заданной точностью (нормируемыми метрологическими характеристиками). По виду вырабатываемого сигнала измерительные генераторы делят на следующие группы:

1. Низкочастотные генераторы сигналов (группа ГЗ) – источники гармонических (синусоидальных) колебаний низких частот (от единиц герц до 300 кГц);

2. Высокочастотные генераторы сигналов (группа Г4) – приборы, вырабатывающие гармонические модулированные и немодулированные колебания высоких и сверхвысоких частот (от 0,1 МГц до десятков гигагерц);

3. Генераторы импульсов (группа Г5) – источники одиночных или периодических видеоимпульсов, обычно прямоугольной формы.

4. Генераторы сигналов специальной формы и генераторы шумовых сигналов (группа Г6). Это генераторы инфранизких частот, генераторы колоколообразных импульсов, генераторы сигналов случайной формы с нормируемыми статистическими параметрами.

Измерительные генераторы гармонических сигналов (НЧ и ВЧ) покрывают диапазон частот от единиц герц до десятков гигагерц. В генераторах ВЧ предусматривают возможность амплитудной (АМ), а в ряде приборов – и частотной (ЧМ) модуляций.

Задающие генераторы (автогенераторы) гармонических колебаний содержат активный четырехполюсник (усилитель) с коэффициентом передачи $K_y(j\omega)$ и пассивный четырехполюсник обратной связи с коэффициентом передачи $K_{oc}(j\omega)$ (рис. 5.1). При их последовательном

соединении коэффициент передачи разомкнутой системы равен

$$K_p(j\omega) = K_y(j\omega) \cdot K_{oc}(j\omega).$$

В разомкнутой системе

$$K_y(j\omega) = \frac{\mathcal{U}_{\text{BbIX}}}{\mathcal{U}_{\text{BX}}}, \text{ a } K_{\text{oc}}(j\omega) = \frac{\mathcal{U}_{\text{oc}}}{\mathcal{U}_{\text{BbIX}}},$$

где $U_{\text{ВХ}}^{\&}$, $U_{\text{ВЫХ}}^{\&}$ и $U_{\text{ОС}}^{\&}$ - комплексные амплитуды в различных точках схемы (рис. 5.1, а. При замыкании цепи обратной связи на вход активного четырехполюсника $U_{\text{ОС}}^{\&} = U_{\text{ВХ}}^{\&}$, тогда $K_y(j\omega) = 1/K_{\text{ОС}}(j\omega)$. Таким образом, в установившемся режиме на частоте генерации ω_r в автогенераторе должно выполняться условие

$$K_y(j\omega_\Gamma) \cdot K_y(j\omega_\Gamma) = 1. \quad (5.1)$$

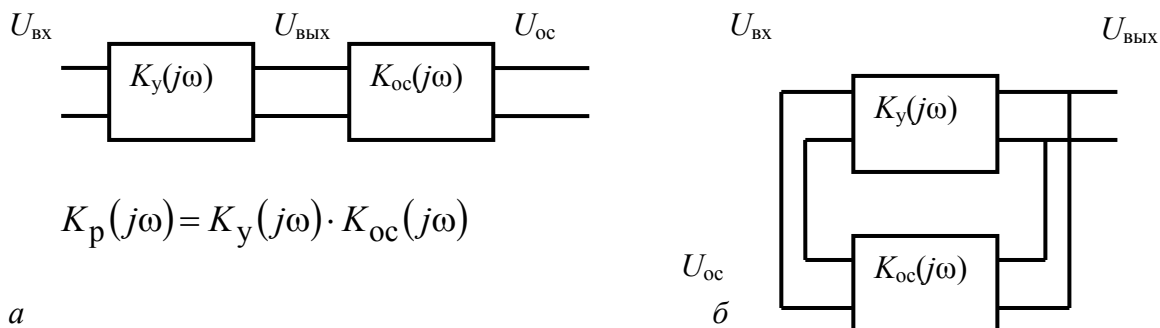


Рис. 5.1. Структура из двух четырехполюсников в разомкнутом виде *а* и с замкнутой цепью обратной связи *б*

Так как $K_y(j\omega) = K_y(\omega)\exp[j\varphi_y(\omega)]$, а $K_{oc}(j\omega) = K_{oc}(\omega)\exp[j\varphi_{oc}(\omega)]$, то из (5.1) следует, что в стационарном режиме в автогенераторе одновременно выполняются условия баланса амплитуд для модулей коэффициентов передачи и баланса фаз для фаз коэффициентов передачи:

$$K_y(\omega_\Gamma) \cdot K_y(\omega_\Gamma) = 1,$$

$$\varphi_{\text{V}}(\omega_{\Gamma}) + \varphi_{\text{OC}}(\omega_{\Gamma}) = 2\pi.$$

Обобщенные структурные схемы генераторов гармонических сигналов НЧ и ВЧ представлены соответственно на рис. 5.2 и 5.3.

Задающий генератор определяет форму и частоту выходного сигнала. В НЧ генераторах этот блок строят по схеме RC – генератора с плавной и дискретной перестройкой по частоте. В генераторах ВЧ используют LC – генераторы с переключаемыми катушками индуктивности и плавной перестройкой конденсатором. Для получения модулированных по частоте сигналов управляющее напряжение подают на задающий генератор.

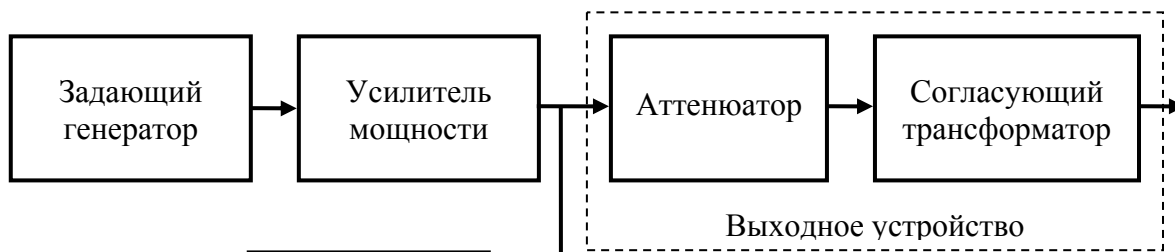


Рис. 5.2. Обобщенная структурная схема генератора НЧ

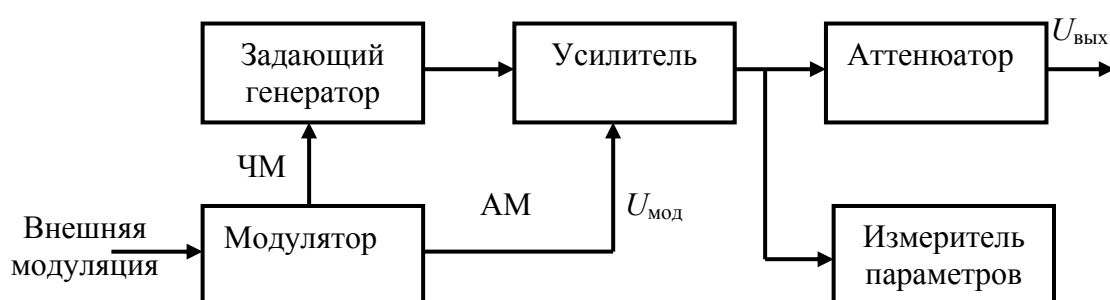


Рис. 5.3. Обобщенная структурная схема генератора ВЧ

Усилитель предназначен для увеличения амплитуды сигнала до **опорного уровня**, по которому калибруют выходной аттенюатор. В усилителе часто предусматривают плавную регулировку опорного уровня. Для получения амплитудной модуляции в ВЧ генераторах используют управление коэффициентом передачи усилителя напряжением $U_{\text{мод}}$.

Устройство контроля параметров представляет собой электронный вольтметр, обеспечивающий паспортную точность установки опорного уровня и его измерение при плавной регулировке. Для генераторов ВЧ предусматривают также измеритель параметров модуляции. В некоторых генераторах опорный уровень фиксирован и поддерживается с необходимой точностью системой автоматической регулировки, поэтому блок контроля параметров не предусматривают.

Аттенюатор предназначен для дискретной регулировки уровня выходного сигнала. В генераторах НЧ на выходе предусматривают согласующий трансформатор для получения стандартных значений выходного сопротивления (например, 5, 50, 600 Ом). С помощью трансформатора реализуют симметричный относительно земляной шины выход. Аттенюатор вместе с согласующим трансформатором образуют выходное устройство генератора НЧ. Генераторы ВЧ обычно имеют одно постоянное значение выходного сопротивления (50 или 75 Ом).

К основным **эксплуатационным** параметрам генераторов гармонических сигналов относят диапазон перестройки по частоте и пределы регулирования среднеквадратического значения выходного напряжения, а также диапазон установки параметров модуляции.

Метрологическими параметрами являются пределы допускаемой погрешности: установки частоты, уровня сигнала и параметров модуляции. Погрешность установки частоты определяется неточностью градуировки, временной нестабильностью задающего генератора, дискретностью шкалы и конструкцией отсчетного устройства. Погрешность установки выходного напряжения определяется точностью контроля опорного уровня и погрешностью градуировки аттенюатора. Паспортная точность гарантируется только при работе генератора на активную нагрузку, сопротивление которой равно выходному сопротивлению $R_{\text{вых}}$. При работе с несогласованной нагрузкой ($R_{\text{н}} \neq R_{\text{вых}}$) появляется систематическая погрешность установки выходного напряжения, равная

$$\delta U = \frac{R_{\text{н}} - R_{\text{вых}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{вых}}}.$$

Из формулы следует, что при подключении к генератору высокоомной нагрузки (вольтметра, осциллографа) выходное напряжение будет в 2 раза выше ожидаемого значения. Для согласования выхода НЧ-генератора в таком случае предусматривают подключение внутреннего нагрузочного резистора ($R_{\text{вн}} = R_{\text{вых}}$).

Неидеальность формы синусоидального сигнала на выходе измерительного генератора проявляется в наличии высших гармонических составляющих. Допустимый их уровень нормируется коэффициентом гармоник (НЧ-генераторы) либо относительным уровнем побочных составляющих.

Генераторы импульсов общего применения предназначены, как правило, для получения видеоимпульсов прямоугольной формы. Они используются при исследовании импульсных и цифровых устройств, измерении переходных характеристик и пр. Структурная схема типового импульсного генератора приведена на рис. 5.4.

Частота повторения импульсов генератора определяется внутренним задающим генератором периодической последовательности импульсов. Частота повторения импульсов калибрована и устанавливается с помощью дискретного и плавного регуляторов. Предусмотрен вывод синхроимпульсов, совпадающих по времени с импульсами задающего генератора. Их используют для синхронизации и запуска внешних устройств (осциллографа, частотомера и пр.). Предусмотрен также запуск импульсного генератора от внешнего источника сигналов произвольной формы, а также разовый запуск при нажатии кнопки.

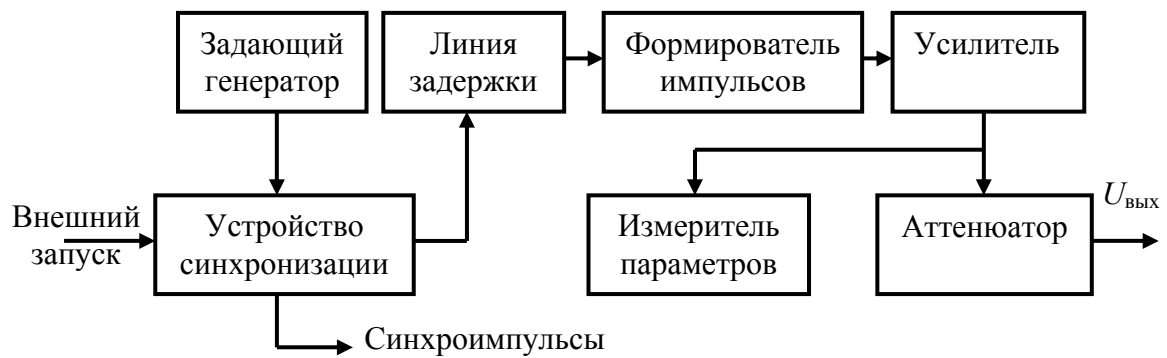


Рис. 5.4. Обобщенная структурная схема импульсного генератора

Блок задержки генератора обеспечивает регулируемый и калиброванный временной сдвиг основных импульсов относительно синхроимпульсов. Этот блок удобно использовать совместно с осциллографом, работающим в режиме внешней синхронизации. Регулировкой задержки можно перемещать импульс по экрану, обеспечивая удобный вид осциллограммы. Калиброванная задержка позволяет измерять временные интервалы методом замещения.

К **эксплуатационным** параметрам импульсного генератора относят диапазон регулирования частоты повторения, длительности и амплитуды импульсов, времени их задержки. **Метрологическими** параметрами являются пределы допускаемой погрешности установки этих параметров и точность воспроизведения формы импульса. В большинстве случаев требуется прямоугольная форма импульса. Осциллограмма реального выходного импульса измерительного генератора представлена на рис. 5.5.

Параметры импульса характеризуют степень близости его формы к идеальной прямоугольной. Амплитуду импульса U_m отсчитывают по усредненной вершине (без учета выброса δ), длительность импульса τ определяют по уровню $0,5U_m$. Длительности фронта τ_ϕ и среза $\tau_{ср}$ показывают качество воспроизведения формы импульса. Эти параметры отсчитывают по уровням $0,1U_m$ и $0,9U_m$. Принято считать импульс прямоугольным, если $\tau_\phi, \tau_{ср} < 0,3\tau$.

Процедура контроля параметров измерительных генераторов и, в ряде случаев, их корректировки называется *поверкой*. Результатом проверки является аттестация прибора на соответствие его паспортному классу точности. Погрешность измерительной аппаратуры, используемой при поверке, не должна превышать $0,1 \dots 0,3$ от допустимой погрешности контролируемого параметра.

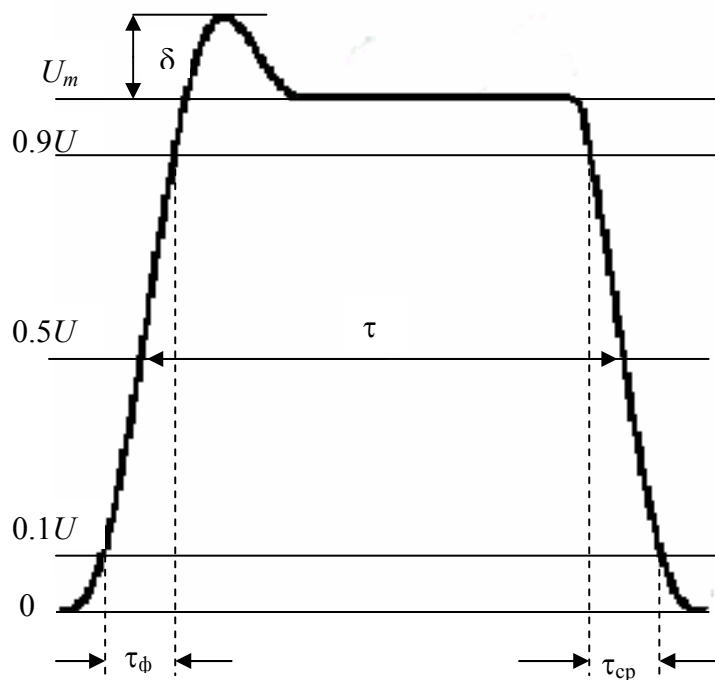


Рис. 5.5. Параметры формы реального прямоугольного импульса

5.2. Основные технические характеристики исследуемых генераторов

Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-112. Представляет собой источник гармонического немодулированного НЧ-сигнала. Генератор имеет следующие параметры:

Диапазон частот – 10 Гц ...10 МГц (6 поддиапазонов). Основная погрешность установки частоты (f , Гц) не хуже $\pm(2 + 30/f)\%$, кратковременная нестабильность частоты после часового прогрева не превышает $\pm 4 \cdot 10^{-4}$ (за 15 мин). Долговременная нестабильность (за 3 ч) – $\pm 50 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент гармоник $< 0,3\%$ (в поддиапазоне 1-10 МГц $< 4\%$).

Опорный уровень плавно регулируется в пределах 0...5 В. Дискретное изменение выходного сигнала производят аттенуатором в пределах 0...-70 дБ. Погрешность установки напряжения на согласованной нагрузке не хуже $\pm 1,5\%$. Номинальное значение выходного сопротивления 50 ± 5 Ом.

Генератор состоит из задающего генератора, усилителя и аттенуатора согласно рис. 5.2. В качестве задающего использован RC-генератор с автоматической стабилизацией амплитуды выходного сигнала. Усилитель позволяет увеличить сигнал до опорного уровня и задает стандартное выходное сопротивление 50 Ом. Контроль опорного уровня в данном генераторе не предусмотрен: для установки его значения используют предварительную калибровку нулевого положения аттенуатора.

Генератор сигналов высокочастотный Г4-102. Структурная схема генератора соответствует рис. 5.3. Диапазон рабочих частот прибора (0,1...50

МГц) разбит на 8 поддиапазонов. Относительная погрешность установки частоты $\pm 1\%$, нестабильность частоты $\pm (250 \cdot 10^{-6} f + 50)$ Гц. Коэффициент гармоник $\leq 5\%$.

Пределы регулировки выходного напряжения $0,5 \dots 5 \cdot 10^5$ мкВ на нагрузке 50 Ом. Погрешность установки не хуже ± 1 дБ. Предусмотрена возможность амплитудной модуляции от внутреннего генератора гармонического сигнала с частотой 1000 Гц и внешней модуляции с частотой $50 \dots 5000$ Гц. Коэффициент модуляции устанавливается в пределах $0 \dots 90\%$ ступенями по 10%. Погрешность установки коэффициента АМ не хуже 10%.

В генераторе предусмотрен стрелочный вольтметр – для контроля опорного уровня 0,5 В на входе аттенюатора и установки уровня модулирующего напряжения (отметка "К" на шкале прибора). Для контроля частоты используют некалиброванный выход IV, к которому подключают внешний электронно–счетный частотомер.

Генератор импульсов Г5-54. Структурная схема генератора соответствует рис. 5.4. Прибор вырабатывает видеоимпульсы прямоугольной формы разной полярности. Диапазон регулировки длительности $0,1 \dots 1000$ мкс (8 поддиапазонов). Погрешность установки длительности не превышает $\pm(0,1\tau + 0,03)$ мкс, нестабильность за один час не превышает $\pm(3 \cdot 10^{-3}\tau + 0,003)$ мкс. Максимальная амплитуда основных импульсов U_m на согласованной нагрузке 500 Ом не менее 50 В; амплитуда регулируется плавно и дискретно. Погрешность установки $\pm(0,1U_m + K)$ В, где K – коэффициент передачи ступенчатого выходного аттенюатора. Выходное сопротивление генератора 500 Ом.

Диапазон частот следования импульсов при внутреннем запуске – 10 Гц...100 кГц. Погрешность установки не хуже 10%. Предусмотрены режимы внешнего и разового запуска.

Длительности фронта и среза основных импульсов на согласованной нагрузке не превышает соответственно 50 и 100 нс. Выброс импульса не более 5%, неравномерность вершины импульса $\leq 5\%$.

Задержка основных импульсов относительно синхроимпульсов Δt регулируется в пределах $0,1 \dots 1000$ мкс и устанавливается с погрешностью не хуже $\pm(0,1\Delta t + 0,03)$ мкс.

5.3. Задание и указания к выполнению работы

В процессе лабораторного занятия выполняется поверка двух измерительных генераторов – высокочастотного или низкочастотного (по указанию преподавателя) и импульсного генератора.

5.3.1. Измерение метрологических параметров низкочастотного генератора сигналов ГЗ-112

5.3.1.1. Измерение погрешности установки частоты генератора

Для выполнения этого пункта используется электронно–счетный частотомер (ЭСЧ) ЧЗ-64. Сигнал с генератора через соединительный кабель и согласующую нагрузку 50 Ом подайте на вход А частотомера. Переключатель вида сигнала генератора ГЗ-112 поставьте в положение ~, ослабление -20 дБ. Ручку плавной регулировки выходного сигнала установите в крайнее правое положение, соответствующее максимальному значению опорного уровня.

Установите на частотомере режим измерения частоты, время счета 0.1 секунды. Для этого нажмите кнопки F_A и цифровую клавишу 5 (что соответствует времени счета $10^5 \text{ мкс} = 0.1 \text{ с}$). Поставьте переключатели входа А в положения закрытого входа ~, *10, полярность запуска положительная (┐), входное сопротивление 1 МОм.

Настройте формирующее устройство входа А, для чего ручкой УРОВЕНЬ добейтесь примерно одинакового свечения светодиодов, расположенных около ручки. При правильной настройке на индикаторе ЭСЧ периодически будет высвечиваться измеренное значение частоты.

Произведите поверку точности установки частоты генератора в трех точках каждого поддиапазона, соответствующих отметкам шкалы 10, 50, 100. В каждой точке измерения проведите дважды: при подходе к отметке слева и справа. Относительное отклонение частоты равно

$$\delta f = \frac{f - f_{\text{изм}}}{f_{\text{изм}}} 100\%$$

где f – отметка по шкале генератора, $f_{\text{изм}}$ – измеренное значение частоты. За погрешность установки принимают максимальное из двух вычисленных значений. Результаты поверки занесите в таблицу по форме 5.1.

5.3.1.2. Измерение погрешности установки ослабления выходного аттенюатора генератора ГЗ-112

Измерения производят с помощью цифрового вольтметра В7-27, подключаемого к генератору через согласующую нагрузку 50 Ом. Поставьте вольтметр в режим измерения переменного тока (переключатель пределов в положении ~V).

Установите частоту генератора 100 кГц, ослабление 0 дБ. Плавной регулировкой выходного напряжения генератора добейтесь показаний 1В. Последовательно переключая ослабление аттенюатора в пределах 0...-70 дБ, измерьте выходное напряжение. При этом выбирайте предел вольтметра так, чтобы обеспечить максимальную точность. Измеренное ослабление рассчитайте по формуле $A = 20 \lg(U_{\text{вых}}/1\text{В})$, дБ. Результаты измерений занесите в таблицу по форме 5.2.

5.3.2. Поверка высокочастотного генератора Г4-102

5.3.2.1. Измерение погрешности установки частоты генератора

Измерение частоты проводите в режиме непрерывной генерации, для чего установите переключатель АМ в положение ВНЕШ., переключатель ГЛУБИНА МОД, % в положение 0%. Частотомер подключите к разъему 1V (некалиброванный выход сигнала несущей частоты – он должен быть включен тумблером 1V).

Проведите поверку генератора по методике п. 5.3.1.1 на трех высокочастотных диапазонах: 6-й диапазон – частоты 5, 7, 10 МГц, 7-й диапазон – частоты 12, 15, 20 МГц, 8-й диапазон – частоты 22, 35, 50 МГц. Рассчитайте погрешность установки частоты. Результаты измерений занесите в таблицу по форме 5.1.

5.3.2.2. Измерение погрешности установки выходного напряжения на калиброванном выходе генератора Г4-102

Подключите цифровой вольтметр В7-27 через согласующую нагрузку 50 Ом к основному выходу генератора (на разъем μV). На генераторе установите частоту 1 МГц, выход μV – включен, режим модуляции – ВНЕШ.

Измерьте выходное напряжение генератора в интервале 100 мкВ...100 мВ в точках 100 мкВ, 1 мВ, 10 мВ и 100 мВ, соответствующих всем дискретным положениям регулятора выхода генератора Г4-102. Предел измерений вольтметра выбирайте из соображений максимальной точности (число значащих цифр на табло должно быть максимальным).

Рассчитайте погрешность установки напряжения. Результаты измерений и расчетов сведите в таблицу по форме 5.1.

5.3.2.3. Измерение погрешности установки коэффициента амплитудной модуляции генератора Г4-102

В настоящей работе исследование режима АМ проводится при внешней модуляции. Подайте сигнал модуляции частотой 1 кГц с НЧ генератора ГЗ-112 на вход АМ. Установите уровень этого сигнала так, чтобы на контрольном индикаторе генератора Г4-102 стрелка показывала на риску К. Точную регулировку проводите ручкой ГЛУБИНА МОД, %. Установите на генераторе уровень выходного напряжения 0,1 В ($1 \cdot 10^5$ мкВ), коэффициент модуляции 90%.

Измерение коэффициента модуляции проводите осциллографическим способом. Используйте осциллограф С1-96, на один из каналов которого подайте исследуемый сигнал с выхода μV . Для получения изображения применяйте внутренний режим синхронизации осциллографа и автоколебательный режим развертки – АВТ. Регулировкой коэффициента отклонения (В/дел.) установите размер осциллограммы по вертикали 5...8

делений. Поставьте коэффициент развертки 0,5 мс/дел., растяжку развертки х1. Вращая ручку УРОВЕНЬ и тем самым регулируя порог срабатывания устройства синхронизации, добейтесь неподвижного изображения модулированного сигнала.

Определение коэффициента модуляции осуществляют, измеряя на экране максимальный A_{\max} и минимальный A_{\min} размеры изображения по вертикали. Коэффициент модуляции рассчитывается по формуле

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} 100\%$$

Проведите измерения коэффициента модуляции для дискретных значений m в диапазоне 10-90% с шагом 10%. Рассчитайте погрешность установки коэффициента модуляции. Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу по форме 5.3.

5.3.3. Измерение параметров генератора прямоугольных импульсов Г5-54

5.3.3.1. Визуальный контроль формы выходных импульсов

Установите на генераторе Г5-54 режим внутреннего запуска, частоту повторения – 10 кГц, длительность импульсов – 1 мкс, выходное напряжение – 5В (50В х 0.1). Подключите вход канала Y осциллографа к выходу 1:1 генератора.

Установите осциллограф в режим ждущей развертки с внешней синхронизацией от генератора импульсов. Для этого соедините выход синхроимпульсов генератора Г5-54 со входом внешней синхронизации осциллографа. Поставьте коэффициент развертки 20 мкс/дел., растяжка х1, коэффициент отклонения – 1 В/дел. Переключатель входного устройства поставьте в положение открытого входа \cong . Ручкой УРОВЕНЬ добейтесь устойчивого изображения импульсов генератора. При необходимости отрегулируйте амплитуду синхроимпульсов.

Установите задержку генератора таким образом, чтобы импульс был бы виден слева (в начале линии развертки). Затем растяните изображение импульса (уменьшением коэффициента развертки) так, чтобы он занимал бы порядка 80% ширины экрана. Зарисуйте форму импульса. Оцените амплитуду и длительность импульса, подсчитав количество делений шкалы, укладываемое в измеряемые параметры и домножив на соответствующий масштабный коэффициент. Для амплитуды – это коэффициент отклонения, указанный на шкале аттенюатора канала Y, для длительности – коэффициент развертки, нанесенный на шкалу переключателя блока разветки канала X. Проследите, чтобы при этом плавные регуляторы коэффициентов отклонения и развертки находились бы в крайнем правом положении.

5.3.3.2. Измерение погрешности периода следования импульсов генератора Г5-54

Подключите вход А частотомера ЧЗ-64 к выходу синхроимпульсов генератора. Переключатели входа частотомера поставьте в следующие положения: открытый вход \cong , полярность запуска – положительная (\lceil), входной аттенюатор – х 1, входное сопротивление 1 Мом. Для включения режима измерения частоты нажмите кнопки f_A и МИНИМ (минимальное время счета). Устойчивости счета добейтесь регулировкой УРОВЕНЬ входа А и амплитудой синхроимпульсов.

Проведите измерение частоты следования импульсов, устанавливая частоту генератора на отметках 1, 3 белой шкалы и 7, 10 черной шкалы плавного регулятора на всех поддиапазонах.

Рассчитайте установленный на генераторе период как величину, обратную частоте. Рассчитайте относительную погрешность установки периода, результаты занесите в таблицу по форме 5.1.

5.3.3.3. Измерение погрешности установки задержки импульсов

При измерении задержки основных импульсов относительно импульсов синхронизации используется режим измерения временного интервала между каналами А и Б, обозначенный на панели частотомера t_{A-B} . На вход А частотомера подайте синхроимпульсы генератора (полярность – положительная), на вход – Б основные импульсы с выхода 1:1. Полярность срабатывания формирующих устройств А и Б – положительная (\lceil). Установите амплитуду основных импульсов 5 В (50В х 0.1), длительность – 0.1 мкс, частота следования – 10 Гц. Начальное значение задержки – 1 мкс. Добейтесь устойчивых показаний частотомера регулировками УРОВЕНЬ входа А и входа Б.

Включите режим t_{A-B} и измерьте временную задержку на отметках 1, 3 белой шкалы и 7, 10 черной шкалы плавного регулятора в пределах временной задержки генератора 1мкс – 1 мс. Рассчитайте относительную погрешность установки временной задержки. Результаты занесите в таблицу по форме 5.1.

5.4. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурные схемы подключения приборов к исследуемым генераторам, таблицы с результатами измерений и расчетов, осциллограммы сигналов.

5.5. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 5.1

Установленное значение по шкале	Измеренное значение	Относительная погрешность, %	Паспортное значение погрешности, %

Таблица 5.2

Установленное ослабление, дБ	Измеренное напряжение, В	Измеренное ослабление, дБ	Погрешность установки ослабления, дБ	Паспортное значение погрешности, дБ

Таблица 5.3

Установленное значение коэффициента модуляции, %	A_{\max}, A_{\min} , дел.	Измеренное значение коэффициента модуляции, %	Относительная погрешность установки, %

5.6. Контрольные вопросы

1. Как классифицируют измерительные генераторы?
2. Чем отличаются измерительные генераторы от других источников сигналов?
3. Изобразите обобщенную структурную схему автогенератора гармонического напряжения и сформулируйте условия его самовозбуждения.
4. Каковы основные параметры НЧ измерительных генераторов?
5. Какие параметры характеризуют форму сигнала у генераторов гармонических колебаний НЧ и ВЧ?
6. Что такое опорный уровень сигнала? Как его устанавливают в измерительных генераторах?
7. В чем отличие измерительных генераторов ВЧ от генераторов НЧ?
8. Каковы основные параметры ВЧ измерительных генераторов?
9. Что такое выходное сопротивление генератора и как оно влияет на амплитуду сигнала?
10. Для чего в выходном устройстве НЧ генератора предусматривают трансформатор?
11. Как характеризуют отличия формы импульса измерительного генератора от идеальной?
12. Для чего применяют задержку импульсов в измерительных генераторах?
13. Какие режимы запуска используют в импульсных генераторах?

6. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА И ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы – изучение основных методов исследования амплитудно-частотных характеристик цепей и устройств, измерение характеристик и параметров полосовых фильтров и колебательного контура.

6.1. Амплитудно-частотная характеристика и способы ее измерения

Комплексный коэффициент передачи цепи связывает спектральные плотности напряжений на входе $S_1(j\omega)$ и выходе цепи $S_2(j\omega)$:

$$S_2(j\omega) = S_1(j\omega) \cdot K(j\omega).$$

При измерении комплексного коэффициента передачи на вход цепи подают гармоническое напряжение с амплитудой U_{m1} и начальной фазой φ_1 : $u_1(t) = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$. Этому напряжению соответствует комплексная амплитуда $\dot{U}_1 = U_{m1} \cdot \exp(j\varphi_1)$. Выходное напряжение в линейной цепи сохраняет гармоническую форму и частоту, но изменяет амплитуду и начальную фазу $u_2(t) = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$. Выходному напряжению соответствует комплексная амплитуда $\dot{U}_2 = U_{m2} \cdot \exp(j\varphi_2)$. Тогда комплексный коэффициент передачи может быть определен в виде

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \exp(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Модуль коэффициента передачи $K(\omega) = U_{m2}/U_{m1}$, а его фаза $\varphi_K = \varphi_2 - \varphi_1$.

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) линейной цепи называют модуль ее комплексной частотной характеристики. Для четырехполюсного устройства – это модуль коэффициента передачи. Из определения следует наиболее простой метод измерения АЧХ: снятие зависимости отношения амплитуд выходного и входного напряжений гармонического сигнала в отдельных частотных точках (“по точкам”) с последующей интерполяцией.

На практике обычно снимают зависимость напряжения на выходе исследуемого устройства от частоты при постоянной амплитуде гармонического напряжения на входе.

Описанный метод измерения АЧХ – “по точкам” – основан на использовании перестраиваемого генератора гармонических колебаний и вольтметра. Структурная схема измерительной установки представлена на рис. 6, а.

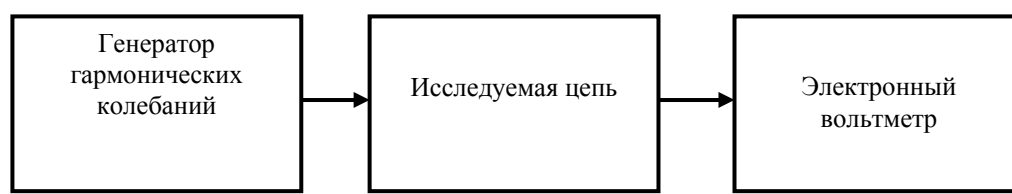
Генератор последовательно настраивают на ряд выбранных частот, а напряжение на выходе исследуемого устройства измеряют вольтметром.

При этом амплитуду напряжения генератора поддерживают постоянной. Зависимость $U_{\text{вых}}(f)$, построенная по результатам измерений, представляет собой АЧХ исследуемой цепи (рис. 6.1, б).

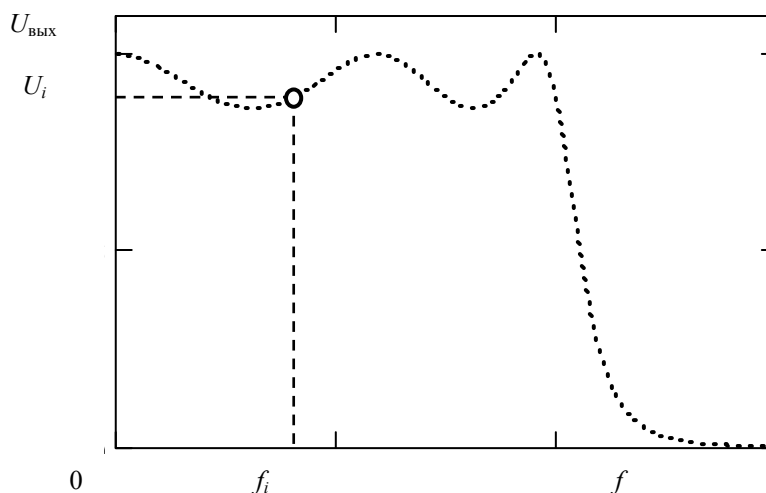
Данный способ обеспечивает достаточно высокую точность измерений. Основными источниками погрешностей являются:

1. погрешность установки частоты генератора;
2. погрешность установки амплитуды напряжения на выходе генератора и его нестабильность в процессе измерения АЧХ;
3. погрешность вольтметра, измеряющего напряжение на выходе цепи;
4. искажения АЧХ, связанные с влиянием выходного сопротивления генератора и входного импеданса вольтметра на параметры исследуемой цепи;
5. погрешность интерполяции АЧХ между измеренными точками.

Вклад первых трех источников в общую погрешность измерения может быть уменьшен использованием приборов более высокого класса точности. Влияние генератора снижают выбором способа подключения к измеряемой цепи. Вольтметр следует выбирать с большим входным сопротивлением и минимальной входной емкостью.



a



б

Рис. 6.1. Измерение АЧХ по точкам:

a – структурная схема измерительной установки;

б – график АЧХ исследуемой цепи

Основной недостаток описанного способа измерения – его трудоемкость и длительность. Кроме того, при заранее неизвестном виде АЧХ

произвольный выбор измеряемых частотных точек может привести к пропуску ее характерных особенностей (в областях резкого изменения кривой АЧХ). При длительных измерениях сказывается влияние температуры, дрейфа питающих напряжений на исследуемое устройство.

6.2. Частотные параметры полосовых фильтров

Чаще всего объектом измерения АЧХ являются частотно-избирательные цепи и устройства, в частности фильтры. Определим их частотные параметры на примере полосовых фильтров (ПФ), которые подразделяются на полосно-пропускающие и полосно-задерживающие. В данной работе исследуются полосно-пропускающие фильтры.

На рис. 6.2 представлены типичные частотные характеристики полосовых фильтров: АЧХ (а) и затухание (б). Основными частотными параметрами реального ПФ являются:

1) **Коэффициент передачи по напряжению** $K(f) = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$.

Коэффициент передачи является функцией частоты. Его значение, соответствующее максимуму АЧХ, обозначают K_0 :

$$K_0 = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}, \quad K'_0 = 20 \lg K_0, \quad (6.1)$$

где K'_0 – значение K_0 , выраженное в децибелах.

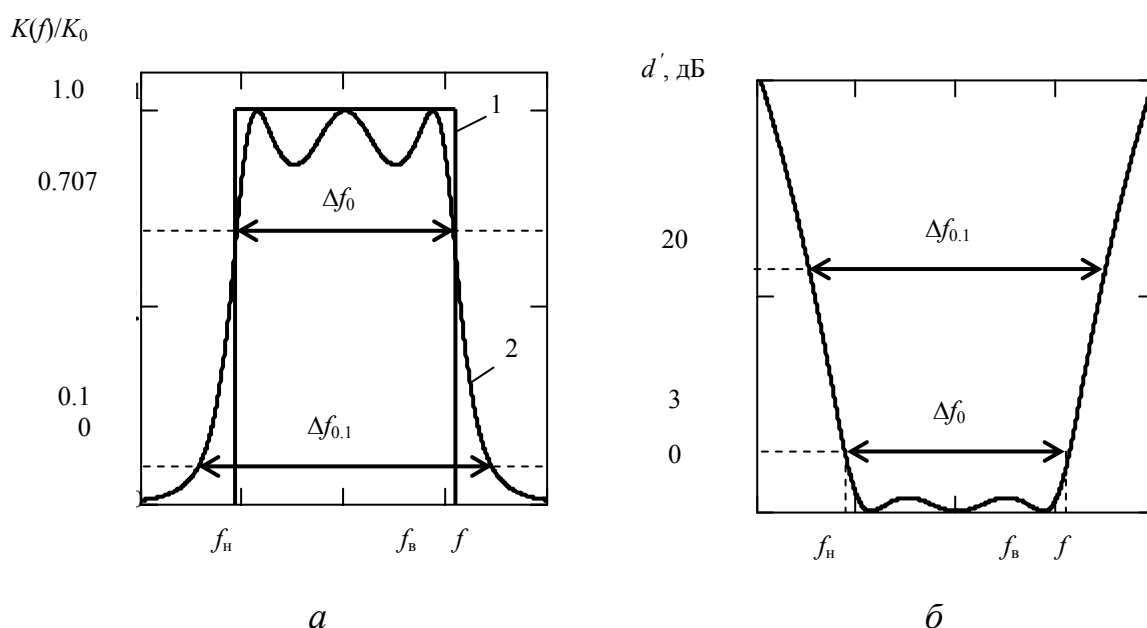


Рис. 6.2. Частотные характеристики полосовых фильтров: а – АЧХ идеального (1) и реального (2) ПФ; б – частотная характеристика затухания фильтра.

2) **Коэффициент затухания** $D(f) = 1/K(f)$ и минимальный коэффициент затухания $D_0 = 1/K_0$. Обычно при исследовании фильтров строят зависимость $d(f) = K_0/K(f)$, представляющую собой “перевернутую” АЧХ (рис. 6.2, б). Выраженное в децибелах значение $d' = 20 \lg d$ называют затуханием

передачи, а его зависимость от частоты – частотной характеристикой затухания фильтра. Частоту, на которой $D=D_0$, называют **частотой минимального затухания**.

3) **Полоса пропускания** Δf – полоса частот, в которой затухание передачи не превышает заданного значения. Ширину полосы пропускания, измеренную по уровню 3 дБ ($K(f)/K_0 = 0,707$), обозначают Δf_0 . Нижняя и верхняя частоты среза фильтра f_H и f_B соответствуют границам полосы пропускания.

4) **Коэффициент прямоугольности** – отношение ширины полосы пропускания, измеренной по одному заданному уровню d_1 , к ширине полосы пропускания, измеренной по другому уровню d_2 . Обычно уровни d_1 и d_2 принимаются равными 20 и 3 дБ, что соответствует значениям $K(f)/K_0$, равным 0,1 и 0,707 соответственно. Тогда коэффициент прямоугольности

$$K_{\Pi} = \Delta f_{0,1} / \Delta f_0. \quad (6.2)$$

Коэффициент прямоугольности показывает степень приближения АЧХ реального фильтра к АЧХ идеального.

5) **Крутизна скатов** АЧХ за пределами полосы пропускания $S_{\text{АЧХ}} = |d[d(f)]/df|$. Этот параметр позволяет оценить степень подавления мешающего сигнала в зависимости от его удаленности по частоте от границ полосы пропускания фильтра в случаях, когда закон убывания АЧХ от расстройки является монотонным. На практике измеряют усредненное значение $S_{\text{АЧХ}} = |\Delta d(f)/\Delta f|$, вычисленное как модуль отношения разности некоторых выбранных значений затухания d_1 и d_2 (например, 10 и 20 дБ) к разности соответствующих им частот $[f(d_1) - f(d_2)]$ и выраженное в дБ/кГц:

$$S_{\text{АЧХ ср}} = \frac{d_1 - d_2}{f(d_1) - f(d_2)}. \quad (6.3)$$

Удобнее пользоваться значениями $S_{\text{АЧХ ср}}$, выраженными в дБ/окт или в дБ/дек. Октавой (или декадой) называют частотный интервал, соответствующий двукратной (или десятикратной) частотной расстройке $\Delta f_d = f(d) - f_0$, где f_0 – частота минимального затухания фильтра; $f(d)$ – частота, соответствующая выбранному затуханию d . Тогда:

$$S_{\text{АЧХ ср}} [\text{дБ/окт}] = 2(d_2 - d_1) \frac{\Delta f_{d_1}}{\Delta f_{d_2}}, \quad (6.4)$$

$$S_{\text{АЧХ ср}} [\text{дБ/дек}] = 10(d_2 - d_1) \frac{\Delta f_{d_1}}{\Delta f_{d_2}}. \quad (6.5)$$

Примером полосового фильтра является одиночный колебательный контур. Его АЧХ существенно отличается от АЧХ идеального ПФ, однако ввиду своей простоты колебательный контур широко применяется в качестве частотно-избирательной цепи.

6.3. Задание и указания к выполнению работы

6.3.1. Измерение амплитудно-частотных характеристик полосовых фильтров ПФ 1 и ПФ 2

Для измерений используется измерительный генератор низких частот ГЗ-118 с дискретной установкой частоты, позволяющий получить исключительно малую ее погрешность, и аналоговый электронный вольтметр ВЗ-38.

Соедините разъем ВХОД макета с разъемом ВЫХОД генератора. К разъему ВЫХОД макета подключите вольтметр. Включите питание приборов и макета.

Поставьте переключатель макета в положение 1 (*Непосредственное соединение*), тогда вольтметр будет показывать выходное напряжение генератора. Ручкой РЕГ. ВЫХОДА установите его равным 0,5 В.

Снимите частотную характеристику фильтра ПФ 1 (переключатель макета в положении 3). Рекомендуемая методика измерения следующая. Сначала необходимо определить диапазон измерения АЧХ. Перестраивая генератор с дискретом 1000 Гц (затем с дискретом 100 Гц) в диапазоне от 100 до 5000 Гц и контролируя выходное напряжение фильтра, найдите максимум АЧХ.

Перестраивая генератор в обе стороны от максимума, определите частоты, на которых напряжение уменьшается примерно в 20 раз. Эти частоты соответствуют диапазону измерения АЧХ полосового фильтра. Далее выберите в пределах диапазона 15 ... 20 частотных точек. Точки располагайте чаще на участках резкого изменения АЧХ (на склонах АЧХ). Результаты измерения сведите в таблицу. Постройте график АЧХ по формуле (6.1), используя линейные масштабы частоты и уровня.

Проведите аналогичным образом измерение АЧХ фильтра ПФ 2 (положение 4 переключателя макета). Его частотная характеристика расположена в области частот, близких к нулевой, поэтому график в линейном масштабе получается сжатым и малоинформативным. Используйте для построения графика АЧХ ПФ 2 логарифмический масштаб частот (см. приложение 2). Обычно его применяют с целью получения наглядного и компактного графика в случаях, когда откладываемая по оси величина изменяется в большом диапазоне значений.

Для использования логарифмической шкалы частот обозначьте ось абсцисс (f , Гц). Затем нанесите на нее с равномерным шагом отметки, соответствующие десятичному логарифму частоты, выраженной в герцах. Однако оцифровку оси частот произведите, используя сами значения частот (в нашем случае 10, 100, 1000, 10000 Гц).

Далее в интервале 10 ... 100 Гц нанесите на оси отметки частот 20, 30, 40, ... , 90 Гц, располагая отметки по закону мантиссы их десятичного логарифма. Аналогично разметьте интервалы частот 100 ... 1000 Гц и 1000 ...

10000 Гц. Масштаб по оси X получился линейным относительно порядка частоты. Очевидно, точка нулевой частоты на оси X при этом отсутствует, поэтому обычно график начинают с низшей частоты диапазона измерения (в нашем случае – с 10 Гц).

Построив график, обратите внимание на то, что он оказался растянутым в низкочастотной области, поэтому наблюдающийся там склон АЧХ хорошо виден.

6.3.2. Измерение частот среза и коэффициента прямоугольности фильтров ПФ 1 и ПФ 2

Частоты среза фильтров можно определить после измерения полной АЧХ по графикам. Однако для большей точности, а также в случае, когда форма АЧХ заранее известна и не представляет интереса, эти параметры измеряют отдельно.

Для определения частот среза f_H и f_B первого полосового фильтра настройте генератор на частоту минимального затухания (максимум АЧХ). Установите исходное напряжение генератора $U_{Г0} = 50$ мВ и запишите значение напряжения на выходе фильтра U_0 .

В положении 1 переключателя макета (непосредственное соединение) увеличьте напряжение генератора в 1,41 раза $U_Г = 1,4U_{Г0} = 70,7$ мВ). Переключив вольтметр на выход исследуемой цепи и уменьшая частоту генератора, добейтесь, чтобы выходное напряжение фильтра равнялось опять U_0 . Запишите значение частоты генератора с точностью 10 Гц; она является нижней частотой среза фильтра. Аналогичным образом (повышая частоту генератора) найдите верхнюю частоту среза. Рассчитайте полосу пропускания фильтра ПФ 1 по уровню 0,707 как разность найденных частот среза.

Полоса пропускания фильтра по уровню 0,1 находится аналогично. Для установки уровня измерения удобно использовать аттенуатор генератора: установите исходное напряжение генератора $U_{Г0} = 50$ мВ при ослаблении аттенуатора 40 дБ. При перестройке частоты вверх и вниз установите ослабление 20 дБ, что соответствует увеличению напряжения в 10 раз.

Рассчитайте полосу пропускания фильтра ПФ 1 по уровню 0,1 и коэффициент прямоугольности по формуле (6.2).

Определите усредненную крутизну скатов по уровням 6 и 20 дБ слева и справа по формулам (6.3) – (6.5).

Все измерения и расчеты повторите для фильтра ПФ 2.

6.3.3. Измерение АЧХ колебательного контура

Поставьте переключатель макета в положение 2. Выходное напряжение генератора 0,5 В. Изменяя частоту генератора сначала с дискретом 100 Гц в

диапазоне от 100 до 900 Гц, затем с дискретом 10 Гц и 1 Гц, определите резонансную частоту f_0 колебательного контура по максимуму показаний вольтметра. Запишите ее значение.

Измерьте АЧХ контура. Для повышения точности используйте следующую методику. Отрегулируйте напряжение генератора так, чтобы вольтметр показывал 100 мВ. Затем уменьшайте частоту генератора и последовательно определите частоты, на которых вольтметр покажет 90, 80, 70,..., 20, 10 мВ. Аналогичным образом проведите измерения при увеличении частоты генератора вверх от резонансной. Запишите результаты измерений в таблицу, по полученным данным постройте график АЧХ колебательного контура.

По графику определите полосу пропускания Δf_0 контура, рассчитайте его добротность $Q = f_0/\Delta f_0$ и коэффициент прямоугольности по формуле (6.2), а также крутизну скатов по уровням 6 и 20 дБ слева и справа по формулам (6.3) – (6.5).

6.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему измерительной установки, таблицы с результатами измерений, графики измеренных АЧХ, расчетные данные, а также краткие выводы по каждому пункту работы.

6.5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение АЧХ линейной цепи или устройства. Можно ли применить это определение к нелинейным и параметрическим цепям?
2. Поясните способ измерения АЧХ “по точкам”, его достоинства и недостатки. Чем ограничена точность данного метода?
3. Назовите основные погрешности измерения АЧХ с использованием генератора и вольтметра и способы увеличения точности.
4. Дайте определения основных частотных параметров полосовых фильтров.
5. Укажите способы измерения полосы пропускания и коэффициента прямоугольности полосового фильтра, не требующие полного измерения его АЧХ.
6. Как рассчитать добротность колебательного контура по измеренной АЧХ?
7. Покажите, что коэффициент прямоугольности колебательного контура не зависит от его добротности. Используйте выражение для обобщенной частотной характеристики резонансного контура.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Цель работы – изучение резонансного метода измерения параметров сосредоточенных элементов электрических цепей, включающее измерение активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей, а также паразитных параметров радиокомпонентов – межвитковой емкости катушки, собственной индуктивности электрического конденсатора и резистора, добротности катушки и тангенса угла потерь конденсатора. Исследуются частотные зависимости параметров катушки с ферромагнитным сердечником и низкочастотного бумажного конденсатора.

7.1. Краткие сведения о резонансном методе измерения параметров сосредоточенных элементов электрических цепей

Резонансный метод основан на измерении параметров колебательного контура, составленного из рабочего (образцового) элемента и исследуемого элемента. В качестве образцового элемента обычно используют конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, обладающий высокой стабильностью, малыми потерями и низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Градуировка рабочего конденсатора делается с большой точностью: от этого во многом зависит общая погрешность метода. Настраивая контур в резонанс и измеряя его добротность, можно по опытным данным рассчитать параметры исследуемой цепи.

Достоинством резонансного метода является то, что он позволяет производить измерения в широком диапазоне частот (от долей до сотен мегагерц). Важная особенность метода – возможность определить *действующие* значения параметров, т. е. фактические значения сопротивления, индуктивности или емкости на зажимах исследуемой цепи с учетом паразитных составляющих ее эквивалентной схемы. Кроме того, по результатам измерений на нескольких частотах можно определить паразитные параметры измеряемых элементов – собственную (межвитковую) емкость катушки, собственную индуктивность конденсатора и т. п.

Резонансный метод измерения параметров сосредоточенных элементов реализуется в измерителях добротности (куметрах). Упрощенная структурная схема прибора (рис. 7.1) содержит диапазонный генератор гармонических колебаний, колебательный контур, состоящий из рабочего конденсатора C_0 и измеряемой цепи, а также электронный вольтметр, по показаниям которого фиксируют момент настройки в резонанс колебательного контура и определяют его добротность Q . В комплект прибора входит набор образцовых (рабочих) катушек индуктивности, используемых, в основном, при измерении емкости методом замещения. На каждой катушке указан диапазон

частот, в пределах которого возможен резонанс с рабочим конденсатором данного прибора.

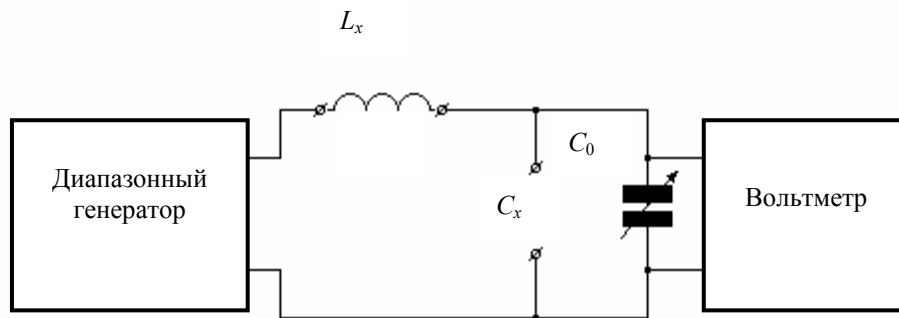


Рис. 7.1. Структурная схема измерителя добротности

Принцип измерения добротности с помощью куметра основан на известном свойстве последовательного колебательного контура – при резонансе амплитуда напряжения на емкости максимальна и в Q раз превышает амплитуду напряжения на входе цепи. Измеряемый элемент подключают либо к клеммам “ L_X ”, последовательно с рабочим конденсатором куметра, либо к клеммам “ C_X ” (в этом случае к клеммам “ L_X ” должна быть подключена рабочая катушка индуктивности, соответствующая частоте измерения). Затем по максимуму показаний вольтметра контур настраивают в резонанс и определяют резонансное значение емкости рабочего конденсатора. Далее параметры элемента определяются расчетным путем.

7.1.1. Измерение индуктивности резонансным методом

При измерении индуктивности L_X возможны два варианта метода. Для относительно небольших значений индуктивности, когда на рабочей частоте f выполняется условие

$$1/[(2\pi f)^2 C_{0\max}] < L_X < 1/[(2\pi f)^2 C_{0\min}],$$

где $C_{0\max}$ и $C_{0\min}$ - соответственно максимальное и минимальное значения емкости рабочего конденсатора куметра, исследуемую катушку включают в контур куметра к клеммам “ L_X ” последовательно, как показано на рис. 7.2, а.

После этого настраивают контур прибора в резонанс и фиксируют резонансное значение емкости рабочего конденсатора куметра C_1 . Действующее значение индуктивности рассчитывается по известной формуле

$$L_X = 1/[(2\pi f)^2 C_1]. \quad (7.1)$$

Если же индуктивность велика ($L_x > 1/[(2\pi f)^2 C_{0\min}]$) и резонанс получить не удастся, то параллельно измеряемой катушке L_x подключают образцовую катушку L_0 из рабочего комплекта прибора (рис. 7.2, б). В этом случае измерение осуществляют в два этапа. Сначала в контур куметра включают только образцовую катушку L_0 , настраивают контур в резонанс и фиксируют резонансное значение рабочей емкости куметра C_1 . Затем параллельно подключают измеряемую индуктивность, повторяют настройку контура и фиксируют новое резонансное значение рабочей емкости куметра C_2 . Значение измеряемой индуктивности рассчитывают следующим образом:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 (C_2 - C_1)} . \quad (7.2)$$

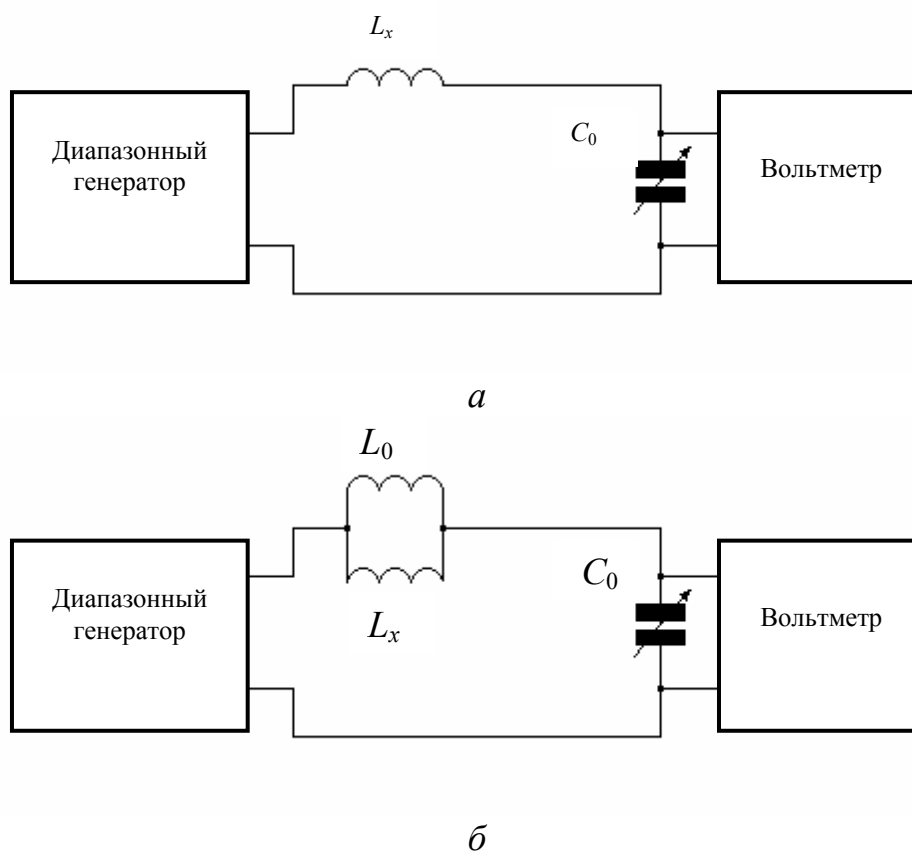


Рис. 7.2. Схемы включения измеряемой индуктивности

Заметим, что в случае, когда исследуемая индуктивность мала $L_x < 1/[(2\pi f)^2 C_{0\max}]$ и применить первый метод нельзя, измерение можно осуществить также в два этапа, но включая L_x последовательно с рабочей катушкой куметра.

7.1.2. Измерение емкости резонансным методом

Измерение емкости производится методом замещения.

При измерении относительно малых значений емкости C_x ($C_{0 \min} < C_x < C_{0 \max}$, где $C_{0 \max}$ и $C_{0 \min}$ – максимальное и минимальное значения рабочей емкости куметра) исследуемый конденсатор включают в контур куметра к клеммам "C_x" параллельно рабочему конденсатору в соответствии со схемой на рис. 7.3, а.

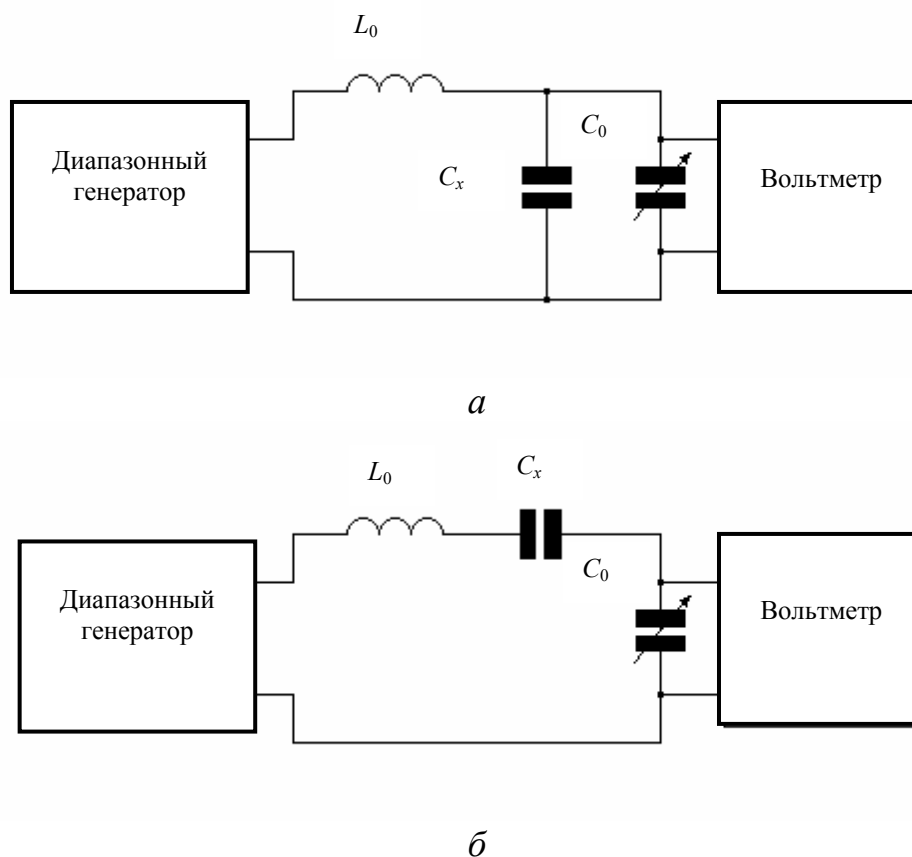


Рис. 7.3. Схемы включения измеряемой емкости

Если же $C_x > C_{0 \max}$, то измеряемый конденсатор включают в контур прибора так, как показано на рис. 7.3, б. Рабочая катушка индуктивности L_x из комплекта куметра, образующая резонансный контур, должна соответствовать частоте, на которой проводятся измерения.

В процессе измерения дважды настраивают контур прибора в резонанс. Первый раз настройку осуществляют, не подключая измеряемый конденсатор, и фиксируют резонансное значение рабочей емкости куметра C_1 . Второй раз настраивают контур, подключив к нему измеряемый конденсатор, – и фиксируют новое резонансное значение рабочей емкости куметра C_2 . Значение измеряемой емкости находят следующим образом:

$$C_x = \begin{cases} C_1 - C_2, & \text{рис. 7.3, а} \\ \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}, & \text{рис. 7.3, б} \end{cases} \quad (7.3)$$

7.1.3. Измерение активного сопротивления резонансным методом

При измерении активного сопротивления R резонансным методом фиксируют изменение добротности контура куметра, вызванное включением в него исследуемого резистора. Искомое значение затем находится расчетным путем.

При малых значениях сопротивления $R \ll 1/(2\pi f C_0)$ (f – частота, на которой проводятся измерения, а C_0 – резонансное значение рабочей емкости куметра) измеряемый резистор включается в контур прибора последовательно (рис. 7.4, а), а при $R \gg 1/(2\pi f C_0)$ – параллельно (рис. 7.4, б).

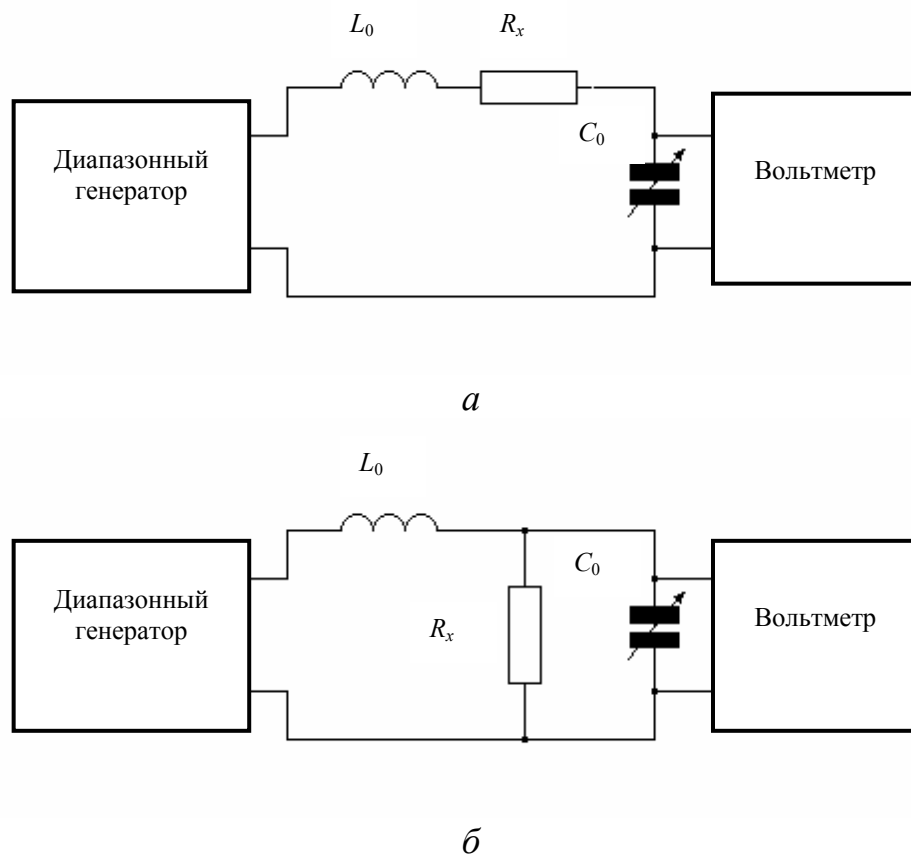


Рис. 7.4. Схемы включения измеряемого резистора

Это обеспечивает достаточно высокую добротность контура и соответственно- малую погрешность фиксации резонанса.

Измерение проводится в два этапа. Сначала контур куметра настраивают в резонанс без исследуемого резистора и фиксируют резонансное значение

рабочей емкости куметра C_1 и собственную добротность контура Q_1 . После этого подключают измеряемый резистор, повторяют настройку контура в резонанс и фиксируют новое значение добротности контура Q_2 и резонансное значение рабочей емкости куметра C_2 . Значение C_2 может отличаться от C_1 из-за паразитных реактивных параметров резистора. Значение измеряемого сопротивления рассчитывается после этого следующим образом:

$$R_x = \begin{cases} \frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{2\pi f C_1 C_2 Q_1 Q_2}, & \text{рис. 7.4, а} \\ \frac{Q_1 Q_2}{2\pi f C_1 (Q_1 - Q_2)}, & \text{рис. 7.4, б} \end{cases}, \quad (7.4)$$

где f – частота, на которой проводились измерения.

7.1.4. Измерение паразитных параметров сосредоточенных элементов электрических цепей

Резонансный метод позволяет определить паразитные параметры сосредоточенных элементов электрических цепей: собственную (межвитковую) емкость катушки и ее добротность, собственную индуктивность и тангенс угла потерь конденсатора, а также собственную емкость (или индуктивность) резистора. Наличие этих параметров и их значения обусловлены особенностями конструкций конкретных элементов и приводит к появлению частотных зависимостей параметров элементов. На рис. 7.5, а, б представлены эквивалентные электрические схемы реальных компонентов электрических схем: катушки, резистора и конденсатора.

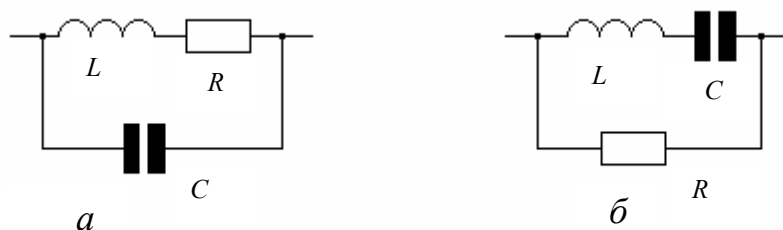


Рис. 7.5. Эквивалентные электрические схемы:
а – катушки и резистора; б – конденсатора

Наличие сложной эквивалентной схемы у реальных компонентов приводит к тому, что резонансным способом измеряют **действующие** значения на рабочей частоте. Действующие значения индуктивности (емкости) определяются из условия равенства реактивных сопротивлений (проводимостей) реального элемента и эквивалентной индуктивности (емкости) на частоте измерения. Для резисторов действующее значение вводят, исходя из равенства активных составляющих сопротивления

реального и идеального элементов. Значения паразитных реактивностей катушки и конденсатора находятся по результатам измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей) на двух частотах.

Реальная катушка индуктивности и конденсатор имеют паразитный резонанс на частоте $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$ (рис. 7.5). При этом характер реактивности элемента на частотах $\omega < \omega_p$ соответствует названию элемента (например, для конденсатора характер реактивности емкостной), а на частотах $\omega > \omega_p$ характер реактивности меняется на противоположный (например, для конденсатора индуктивный).

Измерение собственной емкости и добротности катушки. Пусть L_{x1} и L_{x2} - действующие значения индуктивности катушки, измеренные на частотах f_1 и f_2 соответственно. В этом случае на основании эквивалентной схемы катушки (рис. 7.5, а), можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 L_{x1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 L} + j2\pi f_1 C, \\ \frac{1}{j2\pi f_2 L_{x2}} = \frac{1}{j2\pi f_2 L} + j2\pi f_2 C, \end{cases} \quad (7.5)$$

где L и C – неизвестные значения собственной индуктивности и емкости катушки. Решение системы (7.5) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2/L_{x2} - f_2^2/L_{x1}}, \\ C = \left(\frac{1}{L_{x2}} - \frac{1}{L_{x1}} \right) \cdot \left((2\pi f_1)^2 - (2\pi f_2)^2 \right)^{-1}. \end{cases} \quad (7.6)$$

Если измерения L производились по схеме, изображенной на рис. 7.2, а, то из соотношений (7.1) и (7.6) можно получить формулы для расчета L и C через C_1 и C_2 – резонансные значения емкости рабочего конденсатора куметра на частотах f_1 и f_2 :

$$\begin{cases} L = \frac{f_1^2 - f_2^2}{(2\pi f_1 f_2)^2 (C_2 - C_1)}, \\ C = \frac{f_2^2 C_2 - f_1^2 C_1}{f_1^2 - f_2^2}. \end{cases} \quad (7.7)$$

На практике целесообразно выбирать частоты f_1 и f_2 так, чтобы выполнялось соотношение $f_2 = 2f_1$. В этом случае выражения (7.7) принимают более простой вид:

$$\begin{cases} L = \frac{3}{(4\pi f_1)^2 (C_1 - C_2)}, \\ C = \frac{C_1 - 4C_2}{3}. \end{cases} \quad (7.8)$$

Добротность катушки при включении ее по схеме, изображенной на рис. 7.2, а, находится путем прямого измерения; она примерно равна добротности всего контура куметра, так как выходное сопротивление диапазонного генератора делают малым (доли ома), а потерями в рабочем конденсаторе куметра и входным сопротивлением вольтметра можно пренебречь.

При включении катушки по схеме (рис. 7.2, б) ее собственную добротность Q может быть определена по результатам двух измерений. Сначала измеряют собственную добротность рабочей катушки куметра Q_0 , не подключая измеряемую катушку. Затем измеряют добротность контура куметра Q_1 с подключенной измеряемой катушкой – значение Q_1 должно быть меньше Q_0 . После этого Q_x находится расчетным путем:

$$Q_x = \frac{Q_0 \cdot Q_1}{Q_0 - Q_1}.$$

Измерение собственной индуктивности и тангенса угла потерь конденсатора. Пусть на двух частотах f_1 и f_2 измерены действующие значения емкости конденсатора C_{x1} и C_{x2} соответственно. На основании эквивалентной схемы конденсатора (рис. 7.5, б) для этого случая можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{j2\pi f_1 C_{x1}} = \frac{1}{j2\pi f_1 C} + j2\pi f_1 L, \\ \frac{1}{j2\pi f_2 C_{x2}} = \frac{1}{j2\pi f_2 C} + j2\pi f_2 L, \end{cases} \quad (7.9)$$

где L и C – неизвестные значения собственной индуктивности и емкости конденсатора. Решение системы (7.9) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L = \frac{C_{x2} - C_{x1}}{(2\pi)^2 C_{x1} C_{x2} (f_2^2 - f_1^2)}, \\ C = \frac{C_{x1}}{1 + (2\pi f_1)^2 L C_{x1}}. \end{cases} \quad (7.10)$$

Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ (величина, обратная добротности) конденсатора C , включаемого в контур куметра по схеме (рис. 2.3, а), можно рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(Q_1 - Q_2)C_1}{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}, \quad (7.11)$$

где Q_1 – собственная добротность контура куметра без измеряемого конденсатора; Q_2 – добротность контура куметра при подключенном конденсаторе; C_2 – резонансное значение рабочей емкости куметра при подключенном измеряемом конденсаторе, а C_1 – без него.

Измерение собственной индуктивности резистора. При измерении сопротивления резистора по схеме, показанной на рис. 7.4, а, его собственную индуктивность L можно вычислить по результатам измерения на одной частоте f следующим образом:

$$L = \frac{C_1 - C_2}{(2\pi f)^2 C_1 C_2}, \quad (7.12)$$

где C_1 и C_2 – резонансные значения рабочей емкости куметра соответственно без резистора и при его наличии в контуре.

7.2. Погрешности измерения параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом

Основными источниками погрешностей при измерении параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом являются следующие:

1. Погрешность установки частоты диапазонного генератора куметра и нестабильность амплитуды генерируемого им колебания. Погрешность установки частоты ведет к неточности расчета индуктивностей и активных сопротивлений.

2. Погрешность установки значения рабочей емкости куметра. Это погрешность меры, так как рабочий конденсатор – это эталонный элемент в составе измерительной установки. От его качества зависит точность измерения любой величины. Применяют высокостабильные конструкции переменных конденсаторов с воздушным диэлектриком и керамическими опорными элементами.

3. Погрешность настройки контура куметра в резонанс. Эта погрешность зависит от добротности контура и приводит к неточности определения резонансного значения рабочей емкости куметра. Чем выше добротность контура при измерении, тем уже настроечная кривая контура и меньше эта погрешность. Для увеличения добротности снижают внутреннее сопротивление генератора, активные потери в элементах контура и рабочих катушках, повышают входное сопротивление вольтметра. При измерении параметров элементов с большими потерями необходимо правильно выбрать метод их включения в контур.

4. Погрешности округления при обработке результатов косвенных измерений. Следует заметить, что большинство измерений, выполняемых с помощью куметра, являются косвенными. Поэтому их погрешность

сложным образом зависит от всех вышеперечисленных составляющих и определяется видом схемы измерения.

7.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из куметра Е4-7 с комплектом рабочих катушек и набора измеряемых элементов, смонтированных в экранированных корпусах. В процессе лабораторной работы исследуются катушки из рабочего комплекта, проволочный резистор, низкочастотный бумажный конденсатор и катушка индуктивности с ферритовым сердечником. На верхней панели куметра смонтирована соединительная плата с клеммами и перемычками, предназначенная для удобного подключения измеряемых элементов в резонансную цепь прибора.

7.4. Задание и указания к выполнению работы

Внимание! Перед каждым измерением производите **калибровку** куметра. Смысл калибровки – установка на входе резонансного контура опорного уровня напряжения, относительно которого отградуирована шкала добротностей. Для проведения этой операции переключите тумблер ИЗМЕРЕНИЕ – КАЛИБРОВКА $Q\checkmark$ на передней панели прибора в положение КАЛИБРОВКА $Q\checkmark$, переключатель $\Delta Q - Q$ установите в положение Q . После этого ручкой КАЛИБРОВКА $Q\checkmark$ установите стрелку прибора куметра в положение, отмеченное красным значком \checkmark . Калибровка на этом считается законченной; переключите тумблер ИЗМЕРЕНИЕ – КАЛИБРОВКА $Q\checkmark$ в положение ИЗМЕРЕНИЕ. Прибор готов к работе.

7.4.1. Измерение индуктивности и межвитковой емкости катушки

Измерьте индуктивность одной из катушек рабочего комплекта куметра на двух частотах f_1 и f_2 , попадающих в диапазон частот этой катушки. Для удобства расчетов желательно выбрать частоты так, чтобы выполнялось соотношение $f_2 / f_1 = 2$.

Подключите измеряемую индуктивность к клеммам L_0 ПАР на соединительной плате. С помощью переключателя ДИАПАЗОН и ручки ЧАСТОТА установите частоту генератора куметра, равную f_1 , и произведите калибровку измерителя добротности, как описано ранее. После этого, изменяя емкость рабочего конденсатора куметра с помощью кнопки $\langle \longleftrightarrow \rangle$ и ручки ЕМКОСТЬ pF, настройте контур в резонанс по максимуму показаний вольтметра куметра. В процессе настройки чувствительность вольтметра, устанавливаемую переключателем ПРЕДЕЛЫ Q , выбирайте так, чтобы стрелка индикатора находилась по возможности в правой половине шкалы. Отсчитайте и запишите резонансное значение емкости рабочего конденсатора куметра C_1 .

Установите частоту генератора, равную f_2 , произведите калибровку куметра, после чего опять настройте контур прибора в резонанс и отсчитайте новое резонансное значение емкости рабочего конденсатора куметра C_2 . С помощью выражений (7.7) или (7.8) рассчитайте собственную емкость C и индуктивность L катушки.

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу по форме 7.1

7.4.2. Измерение сопротивления резистора и его собственной индуктивности

Измерьте сопротивление и собственную индуктивность проволочного резистора на частоте 20 МГц. Для этого подключите рабочую катушку куметра, соответствующую выбранной частоте, к клеммам L_0 ПАР на соединительной плате. С помощью переключателя ДИАПАЗОН и ручки ЧАСТОТА установите выбранную частоту генератора, затем произведите калибровку измерителя добротности. После этого настройте контур куметра в резонанс, отсчитайте резонансное значение емкости рабочего конденсатора куметра C_1 и значение собственной добротности рабочего контура прибора Q_1 .

Снимите рабочую катушку и подключите ее к клеммам L_0 после измерения резистор подключите к клеммам $C_x > C_0$; R_x , L_x на соединительной плате, повторите настройку контура в резонанс, отсчитайте новое резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_2 и значение добротности Q_2 контура прибора с подключенным к нему резистором.

С помощью выражений (7.4) и (7.12) рассчитайте сопротивление R и собственную индуктивность L_R резистора. Результаты занесите в таблицу по форме 7.2.

7.4.3. Измерение действующего значения емкости, собственной индуктивности и тангенса угла потерь бумажного конденсатора

Снимите частотную зависимость тангенса угла потерь бумажного конденсатора в диапазоне 3,5 ... 10 МГц (частотные точки 3,5; 5; 10 МГц). Для этого подключите рабочую индуктивность соответствующего частотного диапазона куметра к клеммам L_0 ПАР на соединительной плате. С помощью переключателя ДИАПАЗОН и ручки ЧАСТОТА установите нужную частоту генератора куметра и произведите калибровку прибора. Затем настройте контур прибора в резонанс и отсчитайте резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_1 и значение собственной добротности контура куметра Q_1 .

Подключите исследуемый конденсатор к клеммам C_x на соединительной плате и опять настройте контур прибора в резонанс. Если сделать это не удастся (что возможно, если значение измеряемой емкости превосходит C_1), то подключите измеряемый конденсатор к клеммам $C_x > C_0$; R_x , L_x , а рабочую индуктивность - к клеммам L_0 посл и повторите настройку. После того как контур будет настроен в резонанс, отсчитайте новое резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_2 и значение добротности контура куметра Q_2 с подключенным к нему измеряемым конденсатором.

С помощью выражений (7.3) и (7.11) рассчитайте действующее значение емкости измеряемого конденсатора C и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ (последнее значение рассчитывайте только в случае малых потерь, когда C_x включается в контур куметра параллельно). По результатам измерений на любых двух частотах вычислите с помощью соотношений (7.10) собственную индуктивность измеряемого конденсатора L и собственную емкость C .

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу по форме 7.3. Постройте график полученной частотной зависимости $C_x(f)$.

7.4.4. Исследование частотной зависимости индуктивности и добротности катушки с ферромагнитным сердечником

Измерьте индуктивность и добротность катушки с ферромагнитным сердечником в диапазоне частот 0,5 ... 5 МГц (частотные точки 500 кГц; 1; 3,5; 5 МГц). Подключите измеряемую индуктивность к клеммам R_x , L_x , $C_x > C_0$ на соединительной плате, а клеммы L_0 посл соедините между собой перемычкой. С помощью переключателя диапазонов и ручки ЧАСТОТА установите нужную частоту генератора куметра. Произведите калибровку прибора. После этого настройте контур в резонанс, отсчитайте значения емкости рабочего конденсатора C_1 и добротности катушки Q_x .

Если значение измеряемой индуктивности велико (превосходит индуктивность рабочей катушки установленного частотного диапазона куметра), то так настроить контур в резонанс не удастся. В этом случае к клеммам L_0 пар подключите рабочую катушку соответствующего диапазона частот, повторите настройку и отсчитайте резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_2 . Далее отключите измеряемую катушку от соединительной платы, настройте контур прибора в резонанс и отсчитайте новое резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_1 .

С помощью выражения (7.1) или (7.2) рассчитайте значение индуктивности измеряемой катушки.

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу по форме 7.4. Постройте график зависимости действующего значения индуктивности от частоты $L_x(f)$.

7.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы включения исследуемых элементов в резонансную цепь куметра, результаты измерений и расчетов, выполненных в соответствии с заданием, оформленные в виде таблиц и графиков.

Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 7.1

f_1 , МГц	f_2 , МГц	C_1 , пФ	C_2 , пФ	L_k , мкГн	C_k , пФ

Таблица 7.2

f , МГц	C_1 , пФ	Q_1	C_2 , пФ	Q_2	R , кОм	L_R , мкГн

Таблица 7.3

f , МГц	C_1 , пФ	Q_1	C_2 , пФ	Q_2	C_x -посл/парал	$\operatorname{tg} \delta$	C_x , пФ
3,5						-	
5							
10						-	

Таблица 7.4

f , МГц	C_1 , пФ	C_2 , пФ	L_x посл/парал	Q_x	L_x , мкГн
0,5					
1					
3,5				-	
5				-	

7.7. Контрольные вопросы

1. Поясните сущность резонансного метода измерения параметров сосредоточенных элементов электрических цепей. В чем состоят преимущества данного метода перед другими методами измерения параметров элементов электрических цепей?
2. Укажите источники погрешностей при измерении параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом.
3. Как измеряют индуктивность катушек резонансным методом?
4. Поясните, как можно измерить емкость конденсатора резонансным методом?
5. Как измеряют собственную емкость катушки?
6. Каким образом можно измерить собственную индуктивность конденсатора?
7. Как измеряют тангенс угла потерь конденсатора?

8. Каким образом можно измерить сопротивление и значение собственной индуктивности (или емкости) резистора?
9. Чем ограничена верхняя рабочая частота реальных конденсаторов и катушек индуктивности?
10. Что такое действующие значения индуктивности и емкости?
11. Объясните принцип измерения добротности катушек резонансным методом.
12. Какова роль калибровки куметра при измерении добротности?
13. Почему резисторы с малым сопротивлением следует включать в контур куметра последовательно, а с большим сопротивлением - параллельно?

Приложение 1

Обозначение кратных и дольных приставок единиц физических величин

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		Международное	Русское
10^{18}	экса	E	э
10^{15}	пета	P	п
10^{12}	тера	T	т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

Приложение 2

Децибелы и отношения

Для двух мощностей P_1 и P_2 их отношение, выраженное в децибелах равно

$$P_2/P_1 [\text{дБ}] = 10 \lg(P_2/P_1). \quad (\text{П2.1})$$

$$1 \text{ децибел} = 0.1 \text{ бела} \quad (1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)).$$

Для двух напряжений U_1 и U_2 их отношение, выраженное в децибелах равно

$$U_2/U_1 [\text{дБ}] = 20 \lg(U_2/U_1). \quad (\text{П2.2})$$

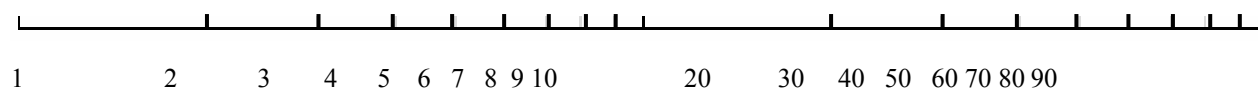
Ниже приведена таблица соответствия отношения двух величин в децибелах и относительных единицах.

Децибел	Отношение мощностей	Отношение мощностей	Децибел	Отношение мощностей	Отношение напряжений
0	1,000	1,000	14,0	25,120	5,012

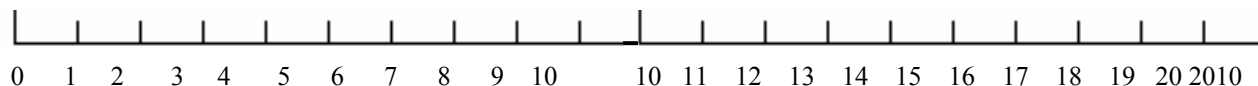
0,1	1,023	1,012	15,0	31,620	5,623
0,2	1,047	1,023	16,0	39,810	6,310
0,3	1,072	1,035	17,0	50,120	7,079
0,4	1,096	1,047	18,0	63,100	7,943
0,5	1,122	1,059	19,0	79,430	8,913
0,6	1,148	1,072	20,0	100,0	10,0
0,7	1,175	1,084	25,0	316,2	17,780
0,8	1,202	1,096	30,0	1000,0	31,620
0,9	1,230	1,109	35,0	3162,0	56,230
1,0	1,259	1,122	40,0	10^4	100,0
2,0	1,585	1,259	45,0	$3162 \cdot 10^4$	177,80
3,0	1,995	1,413	50,0	10^5	316,20
4,0	2,512	1,585	55,0	$3162 \cdot 10^5$	562,30
5,0	3,162	1,778	60,0	10^6	10^3
6,0	3,981	1,995	65,0	$3162 \cdot 10^6$	$1,778 \cdot 10^3$
7,0	5,012	2,239	70,0	10^7	$3,162 \cdot 10^3$
8,0	6,310	2,512	80,0	10^8	10^4
9,0	7,943	2,818	90,0	10^9	$3,162 \cdot 10^4$
10,0	10,0	3,162	100,0	10^{10}	10^5
11,0	12,590	3,548	110,0	10^{11}	$3,162 \cdot 10^5$
12,0	15,850	3,981	120,0	10^{12}	10^6
13,0	19,950	4,467	150,0	10^{15}	$3,162 \cdot 10^7$

Логарифмический масштаб часто используется наряду с линейным. Например, при построении графиков АЧХ можно использовать логарифмический масштаб по оси частот (П2.1). Ниже показан принцип построения логарифмического масштаба частоты в диапазоне от 1 до 100 кГц (верхняя ось). На нижней оси показано отношение частот, выраженное в дБ (по мощности).

f , кГц



$$f_2/f_1 [\text{дБ}] = 10 \lg(f_2/f_1)$$



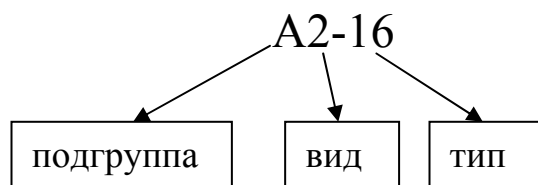
При этом принято $f_1 = 1$ кГц. (f_1 не может быть равно 0 из-за невозможности деления на 0). Например, частоте $f_1 = 2$ кГц соответствует > 3 дБ, частоте $f_2 = 8$ кГц соответствует > 9 дБ и т. д.

При выборе логарифмического масштаба вертикальной оси обычно используется отношение величин по напряжению (П2.2).

Приложение 3

Обозначения радиоизмерительных приборов

По характеру измеряемых величин радиоизмерительные приборы делятся на подгруппы, по основной выполняемой функции на виды, а по совокупности технических характеристик и очередности разработки - на типы. Всего имеется 20 подгрупп для отечественных приборов, каждая из которых состоит из нескольких видов, вид приборов содержит несколько типов. Приборам подгруппы присваивают буквенное обозначение (буквы русского алфавита), например А- прибор для измерения тока. Виду приборов присваивают буквенно-цифровое обозначение. Например, А2 - амперметры постоянного тока. Приборам каждого типа присваивают порядковый номер модели, например А2-16.



Ниже приведены обозначения наиболее часто используемых радиоизмерительных приборов, в том числе в лаборатории "Метрологии и радиоизмерений".

Обозначение	Прибор
В	Приборы для измерения напряжения
В1	Вольтметры постоянного тока
В3	Вольтметры переменного тока
В4	Вольтметры импульсного тока
В7	Вольтметры универсальные
Г	Генераторы измерительные
Г3	Генераторы сигналов низкочастотные
Г4	Генераторы сигналов высокочастотные
Г5	Генераторы импульсов
Обозначение	Прибор
Е	Приборы для измерения параметров компонентов и цепей с сосредоточенными постоянными
Е4	Измерители добротности
Е7	Измерители параметров универсальные
С	Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра
С1	Осциллографы универсальные
С4	Анализаторы спектра

Ф	Приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания
Ф2	Измерители разности фаз
Х	Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств
Х1	Приборы для исследования амплитудно-частотных характеристик
Ч	Приборы для измерения частоты и времени
ЧЗ	Частотомеры электронно-счетные

Приложение 4

Условные обозначения, наносимые на электроизмерительных приборы и вспомогательные части

Наименование	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Электромагнитный прибор	
Электродинамический прибор	
Ферродинамический прибор	
Электростатический прибор	
Индукционный прибор	
Наименование	Обозначение
Постоянный ток	
Переменный ток	
Постоянный и переменный ток	
Класс точности при нормировании погрешности в процентах от предела шкалы	1,5