

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

---

С. А. Баруздин    А. А. Данилин

## **ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И РАДИОИЗМЕРЕНИЙ**

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2015

УДК 621.317(075)

ББК 3 842

М54

**Баруздин С. А., Данилин А. А.**

М54 Основы метрологии и радиоизмерений. Лабораторный практикум /  
СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 124 с.

ISBN 978-5-7629-

Представлены описания семи лабораторных работ, выполняемых при изучении дисциплины «Основы метрологии и радиоизмерений».

Предназначен для студентов факультета радиотехники и телекоммуникаций направлений 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технологии электронных средств», а также специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

УДК 621.317(075)

ББК 3 842

Рецензенты: кафедра конструирования и технологии электронных и лазерных средств ГУАП; канд. техн. наук Сорокин А. А.

Утверждено

редакционно-издательским советом университета

в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7629-

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015

## Введение

В практике инженерной деятельности часто сталкиваются с необходимостью проведения тех или иных измерений. Такая ситуация присуща и радиоэлектронике, для которой характерно большое количество разнообразных параметров и характеристик сигналов, цепей, устройств и их компонентов. Характерно для нее также то, что диапазон измеряемых в радиоэлектронике параметров чрезвычайно широк. Наконец, точность измерений в этой области науки и техники является довольно высокой, поэтому очень часто к радиоэлектронным измерениям прибегают и в других областях науки и техники, преобразуя измеряемую физическую величину, например механического характера, в электрический сигнал.

Какими бы точными приборами и методами не проводились измерения, результат измерения будет отличаться от истинного значения физической величины. Следовательно, всегда присутствует погрешность измерения. Таким образом, нельзя считать процесс измерения завершенным, пока не будет оценена и сопоставлена с допустимой погрешность измерения. Оценка погрешности измерения в современных условиях – задача комплексная и сложная. Чем меньше погрешность, тем выше точность измерения. Одна из основных задач метрологии – обеспечение необходимой точности и достоверности измерительной информации.

Настоящий лабораторный практикум знакомит студентов с основными измерительными приборами, наиболее часто встречающимися в практике радиоэлектронных измерений. Наряду с изучением принципов работы этих приборов большое внимание отводится обработке результатов измерений. Таким образом, лабораторный практикум позволит студентам приобрести навыки квалифицированного проведения измерений и поможет при выполнении лабораторных работ по последующим дисциплинам, а также в дальнейшей профессиональной деятельности.

## **1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Цель работы – изучение устройства, основных технических характеристик и применений электромеханических измерительных приборов магнитоэлектрической, электродинамической и электромагнитной систем. Измеряются постоянные и переменные напряжения и токи, анализируются погрешности 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 уравновешивания 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 легкий алюминиевый каркас, 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

$$M_{вр} = BSnl_p, \quad (1.1)$$

где  $B$  – индукция 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,

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

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.

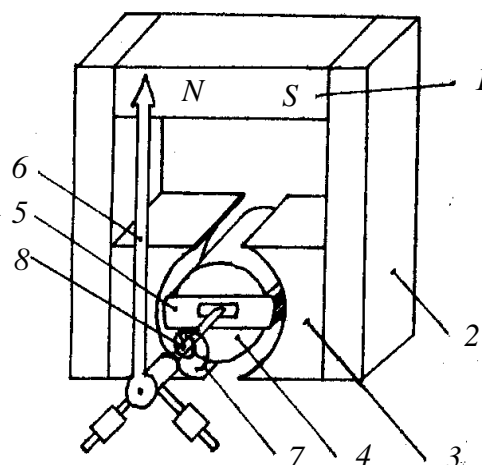


Рис. 1.1. Конструкция магнитоэлектрического измерительного механизма

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 рамки (его постоянной составляющей)

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

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.

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:

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

где  $R_{\text{р}}$  – сопротивление рамки ИМ;  $I_{\text{р max}}$  – ток полного отклонения рамки.

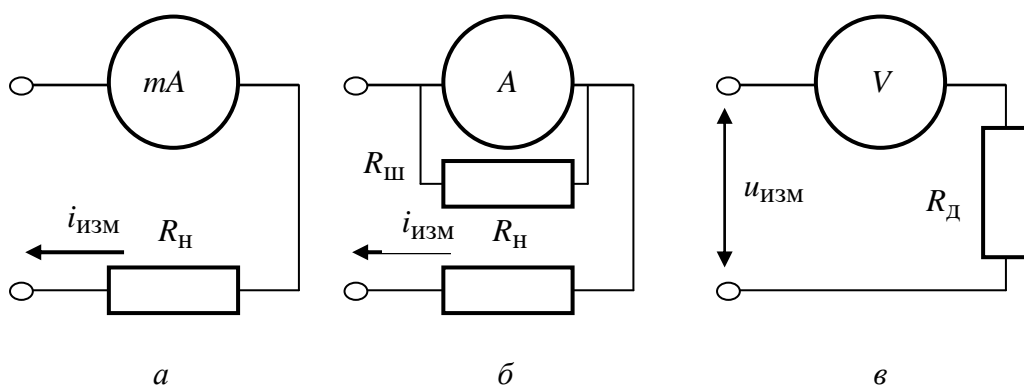


Рис. 1.2. Схемы включения магнитоэлектрических измерительных механизмов

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

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

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 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 наиболее точным электромеханическим механизмам. При использовании в них высокостабильных магнитов могут быть созданы приборы классов точности вплоть 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 сильных 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 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:

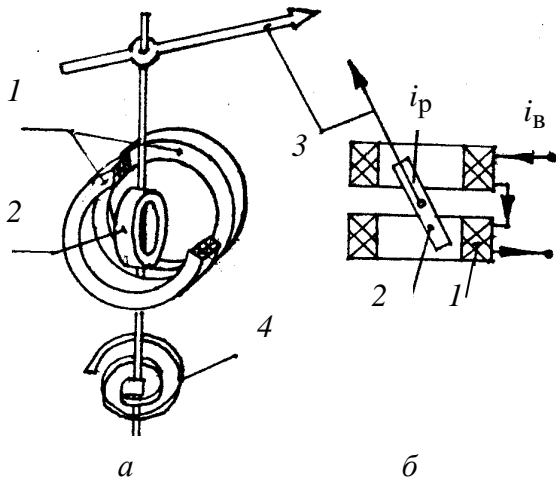


Рис. 1.3. Конструкция электродинамического измерительного механизма

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

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

$$W_{эм} = \frac{1}{2}L_B i_B^2 + \frac{1}{2}L_P i_P^2 + M i_B i_P, \quad (1.7)$$

где  $L_B$  и  $L_P$  – индуктивности подвижной и неподвижной катушек соответственно;  $i_B$  и  $i_P$  – 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

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_B(t) i_P(t) dt, \quad (1.8)$$

где  $W$  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 схемы вольтметра, амперметра и ваттметра соответственно средней за период активной мощности.

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

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

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

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

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



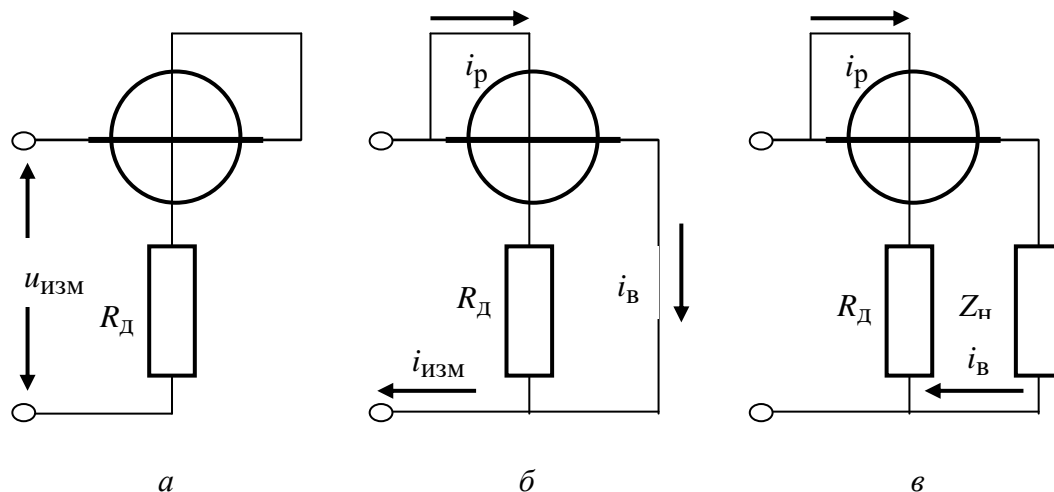


Рис. 1.4. Схемы включения электродинамических измерительных механизмов

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  $b = i_{\text{в}} i_{\text{п}} / i_{\text{изм}}^2$  – 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 удается 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 ферромаг-

нитные элементы, а следовательно, отсутствуют и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков. Класс точности этих приборов – до 0,05. Столь малая погрешность, однако, наблюдается 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  $W_{эм}$  происходит только за счет изменения индуктивности катушки  $L$ , можно показать, что

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I_p^2, \text{ где } I_p \text{ – среднеквадратичное}$$

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 в катушке.

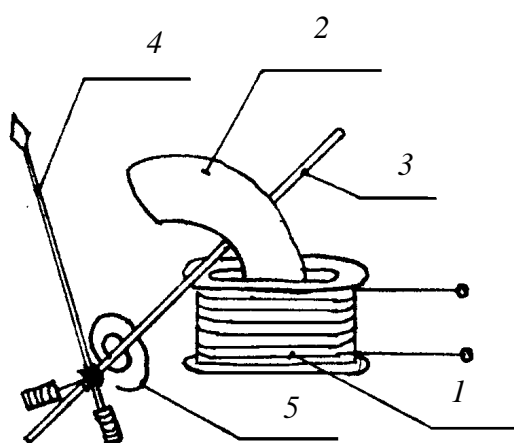


Рис. 1.5. Конструкция электромагнитного измерительного механизма

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 средне-квадратическое 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.

## 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 определяется выражением

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

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  $P2$  и  $P3$ , первый из которых магнитоэлектрической, а второй – электромагнитной системы, а также эталонный прибор  $P1$  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.

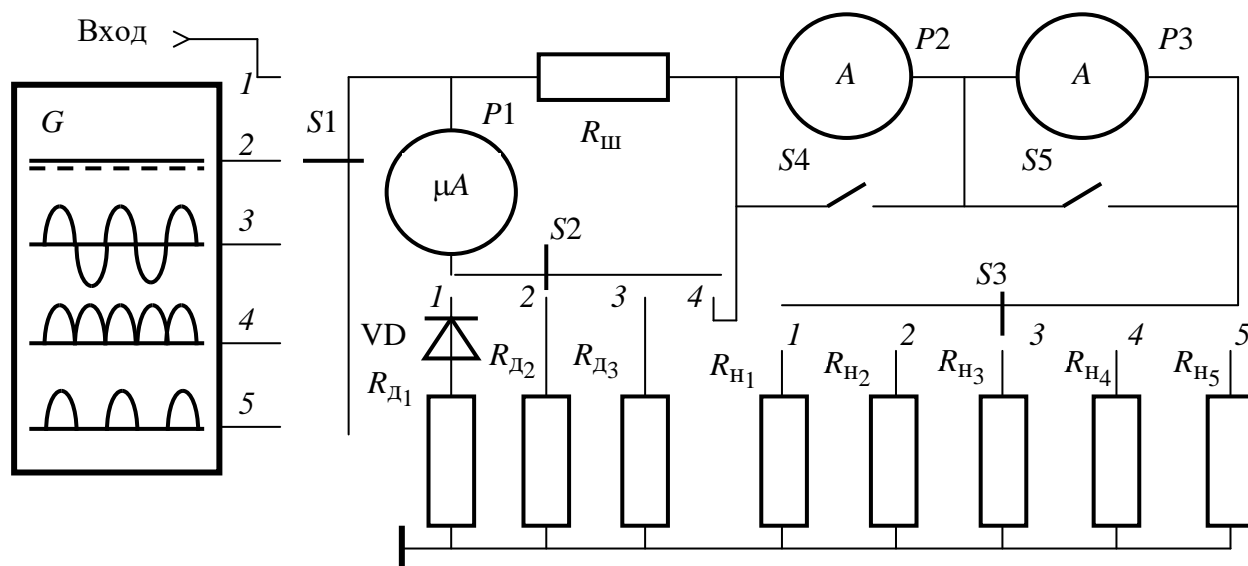


Рис. 1.6. Схема лабораторного макета

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  $R_{H1} \dots R_{H5}$ .

Параметры приборов и макета:  $R_{д2} = 29,3$  кОм,  $R_{д3} = 79,3$  кОм,  $R_{ш} = 0,069$  Ом,  $R_{p1} = 688$  Ом,  $R_{p2} = 0,06$  Ом,  $R_{p3} = 0,35$  Ом,  $L_{p3} = 81$  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 (ток полного отклонения рамки)  $I_{pmax} = 100$  мкА.

Условные обозначения, нанесенные на шкалу приборов, представлены в прил. 5.

## 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, измерьте ток нагрузки амперметрами  $P2$ ,  $P3$  и эталонным прибором  $P1$ . Для измерения тока эталонный прибор подключается с помощью переключателя  $S2$  параллельно шунту  $R_{ш}$ . Измерьте также напряжение  $U_H$  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 значения  $R_H$  из результатов в 1.4.4.

Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 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 нульсирующего и переменного тока**

Переключателем  $S3$  включите в схему нагрузочный резистор  $R_{Н1}$ . 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 1.4.1.

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

Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 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  $R_{Н1}$ , 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  $P3$  1 А 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 значение сопротивления  $R_{Н1}$  из результатов 1.4.4.

Результаты занесите в табл. 1.3. Постройте графики.

#### 1.4.4. Расчет сопротивлений нагрузки

Расчет выполняется на основании результатов измерений, сделанных в 1.4.1. По измеренным значениям тока  $I_{p1}$  и напряжения  $U_H$  (табл. 1.1) при выключенных приборах  $P2$  и  $P3$  рассчитайте сопротивления  $R_{Н1} \dots R_{Н5}$  (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 значениями  $x_i$ , 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  $\Delta x_i$  определяются 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  $\Delta x_i$  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 значения  $\delta_A$ , определенные по формулам (1.16), (1.17), необходимо умножить на 100.

Рассчитайте предел относительной погрешности этих косвенных измерений по формуле (1.17). Результаты занесите в табл. 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 по установленным формам и графиков.

### 1.7. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 1.1

$R_H$	$U_H, В$	$\delta U, \%$	Положение переключателей $S4$ и $S5$								
			$S4$ и $S5$ выключены (разомкнуты)						$S4$ – вкл. $S5$ – вкл.		
			$I_{P1}, А$	$I_{P2}, А$	$\delta I_{P2}, \%$	$\delta I_{P2M}, \%$	$I_{P3}, А$	$\delta I_{P3}, \%$	$\delta I_{P3M}, \%$	$I_{P1}, А$	$\delta I_{P1}, \%$
$R_{H1}$											
...											
$R_{H5}$											

Таблица 1.2

Положение переключателя $S1$	$U_H, В$	$\delta U, \%$	$I_{P2}, А$	$\delta I_{P2}, \%$	$I_{P3}, А$	$\delta I_{P3}, \%$
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				
	$R_{H1}$	$R_{H2}$	$R_{H3}$	$R_{H1}$	$R_{H5}$
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 переменный?
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 равен 1 А, а класс точности прибора 1,0.

## **2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫМИ ВОЛЬТМЕТРАМИ**

Цель работы – изучение принципа работы цифрового вольтметра и измерительных преобразователей при измерении постоянных и переменных напряжений различной формы.

### **2.1. Измерение постоянных напряжений цифровыми вольтметрами**

#### **2.1.1. Структурные схемы цифровых вольтметров и их параметры**

Цифровыми вольтметрами (ЦВ) называют приборы для измерения напряжения с цифровой индикацией результата. Процесс преобразования аналогового значения напряжения в цифровой код реализуется аналого-цифровым преобразователем прибора (АЦП). ЦВ обычно классифицируют по типу АЦП. Выделяют две группы: интегрирующие ЦВ и ЦВ мгновенных значений.

Первые определяют среднее напряжение за время усреднения (интегрирования). В таких вольтметрах используют медленные АЦП, которые обеспечивают высокую помехоустойчивость приборов. Вторая группа ЦВ преобразует мгновенное значение входного сигнала в один выбранный момент времени. Вольтметры мгновенного значения зависят от уровня помехи в момент измерения напряжения.

ЦВ имеют по сравнению с аналоговыми следующие достоинства:

- высокая и заранее известная точность; точность цифрового индикатора не ограничена длиной шкалы и минимальным ее делением;
- широкий диапазон измерения напряжения при постоянной точности, высокая чувствительность;
- отсутствие субъективной погрешности:

Цифровым вольтметрам присущи общие достоинства цифровых приборов – многофункциональность, отсутствие субъективных погрешностей, высокая, заранее известная точность, простота автоматизации, возможность программной обработки результатов и легкость включения в измерительные системы

К недостаткам ЦВ следует отнести относительную сложность и дороговизну, ограниченную рабочую полосу и небольшое быстроедействие.

Структурная схема ЦВ общего применения представляет собой схему электронного вольтметра постоянного тока, в котором вместо стрелочного индикатора на выходе предусмотрены АЦП и цифровое табло.

Для измерения переменного напряжения используют преобразователи.

Параметры цифровых вольтметров: диапазон измерения напряжения, полоса рабочих частот, входной импеданс, время измерения. Специфические параметры ЦВ:

- Разрешающая способность (шаг квантования входного напряжения). Это минимальный интервал входного напряжения, который способен различить АЦП. Связан с разрядностью АЦП  $m$  (двоичной) следующим образом:  $\Delta U = 2^{(-m)} U_{\max}$ . Определяет минимальную погрешность измерения напряжения и порог чувствительности вольтметра. Обычно соответствует единице младшего разряда результата измерения.
- Разрядность ЦВ – это число десятичных знаков (разрядов) в результате, выводимом на табло отсчетного устройства. Например, разрядность 4 знака соответствует показаниям вольтметра в интервале 0000...9999. Если старший разряд неполный (например, может принимать значения 0 и 1), то говорят о дробной разрядности вольтметра. Так,  $3\frac{1}{2}$  разряда соответствует индикации результата в пределах 0000...1999,  $3\frac{3}{4}$  – до 3999.
- Предел допускаемой основной и дополнительной погрешности согласно ГОСТ 14014–94 указывают в стандартном виде, %:  $\delta = \pm(c + d(U_{\max}/U_x - 1))$ , где  $U_{\max}$  – верхний предел измерения. Отношение  $c/d$  называют классом точности цифрового вольтметра. Иногда используют более простой вид:  $\delta = \pm(c' + d(U_{\max}/U_x))$ , %.

Формула для погрешности включает мультипликативную и аддитивную части и учитывает как погрешности квантования, так и инструментальные погрешности АЦП (нелинейность преобразования, смещение нуля) и других блоков вольтметра.

### **2.1.2. Цифровые вольтметры с двойным интегрированием**

Интегрирующий вольтметр позволяет улучшить помехоустойчивость. Он реализует принцип время-импульсного преобразования с использованием *интегратора*. Это – аналоговый преобразователь на операционном усилителе, обеспечивающий связь между входным и выходным напряжением в виде

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ВХ}}(t) dt.$$

Здесь  $RC$  – постоянная времени интегратора, знак «минус» отражает инвертирование сигнала операционным усилителем. Структурная схема вольтметра с двойным интегрированием (двухтактным интегрированием) представлена на рис. 2.1, а, схема интегратора – на рис. 2.1, б, а временные диаграммы, поясняющие работу вольтметра, – на рис. 2.2.

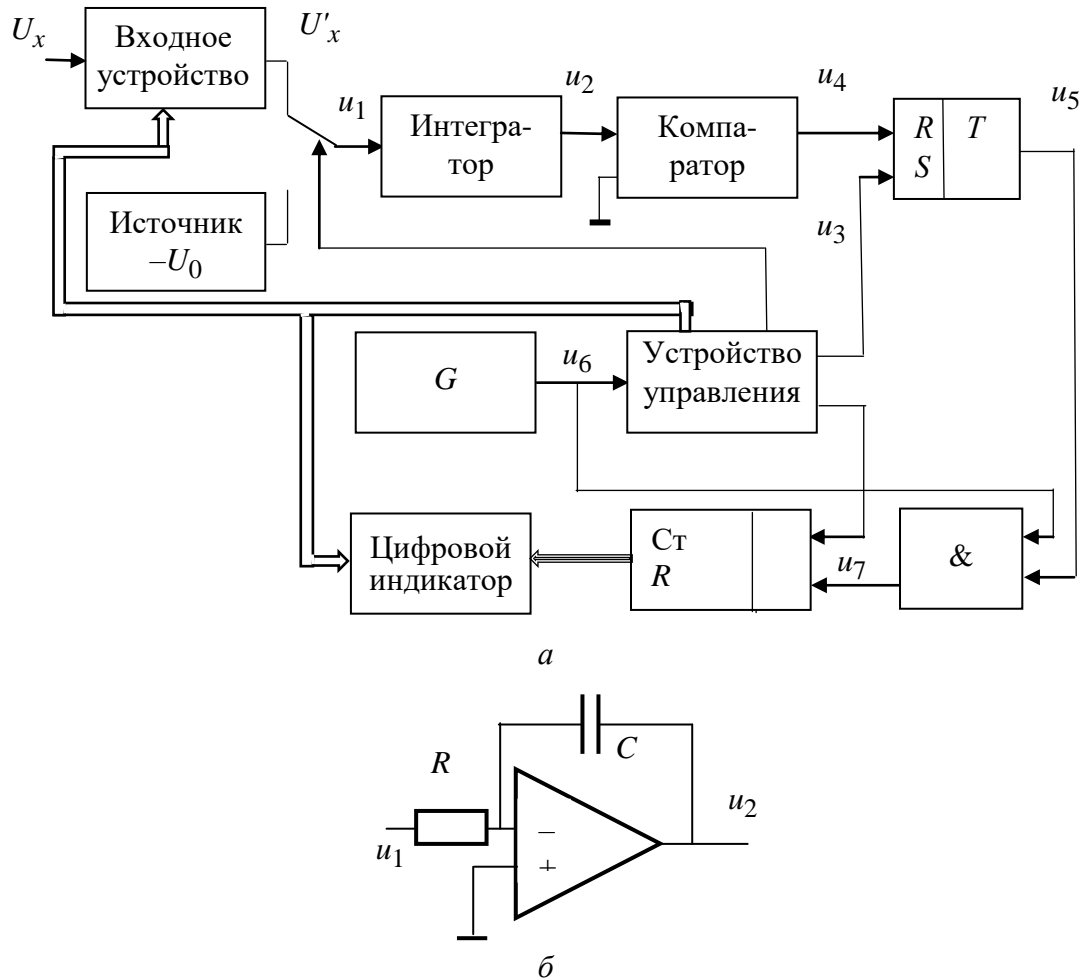


Рис. 2.1. Схемы: а – вольтметра и б – интегратора

В начале цикла измерения устройство управления устанавливает счетчик импульсов Сч в нулевое состояние. Оператор, выполняющий измерения, через устройство управления выбирает предел измерений, тем самым устанавливает коэффициент, связывающий измеряемое напряжение  $U_x$  с напряжением  $U'_x = kU_x$ . Также устройство управления переводит переключатель на входе интегратора к выходу входного устройства и интегратор начинает первый цикл интегрирования в течение интервала времени  $T_1$ . Длительность

этого интервала фиксирована и формируется из импульсов кварцевого генератора с частотой  $f_0$  (период импульсов  $T_0 = 1/f_0$ ) путем деления частоты в  $k_d$  раз ( $T_1 = k_d T_0$ ).

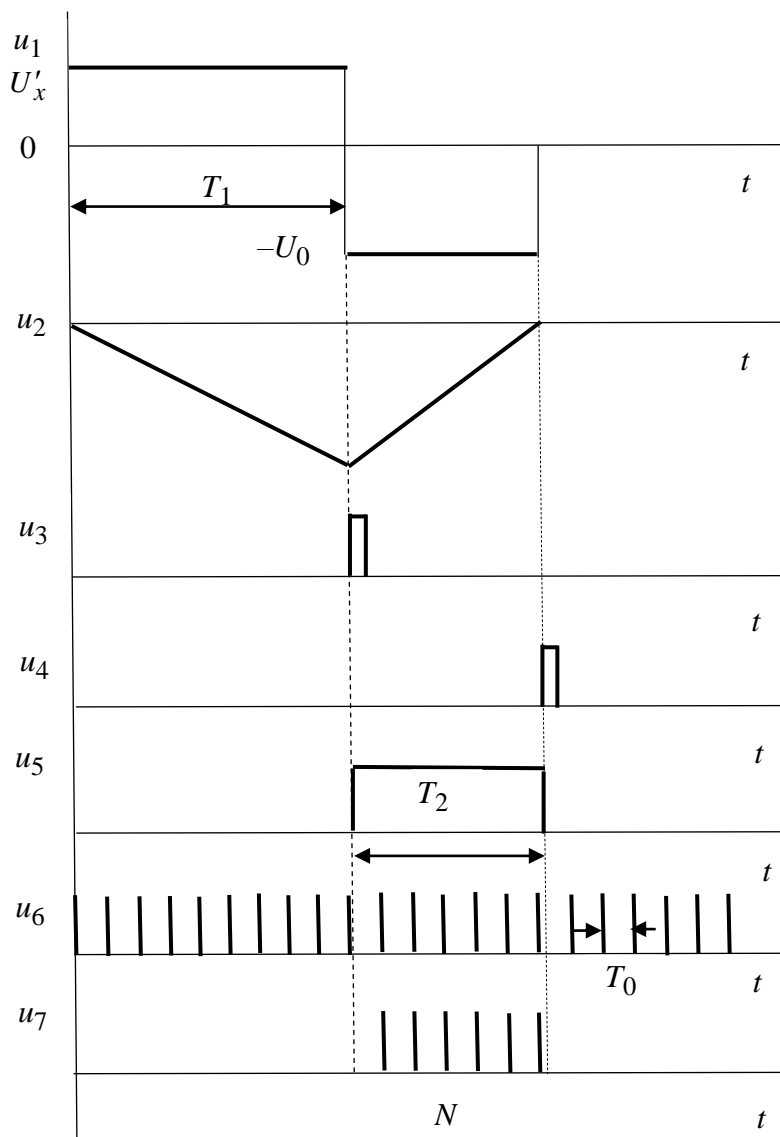


Рис. 2.2. Временные диаграммы напряжений

По истечении интервала  $T_1$  устройство управления подключает ко входу интегратора источник образцового напряжения  $U_0$  (он имеет противоположную измеряемому напряжению полярность, в рассматриваемом случае – отрицательную). Одновременно устройство управления переводит  $RS$ -триггер  $T$  в состояние логической 1.

Напряжение с выхода интегратора поступает на один из входов компаратора, который сравнивает это напряжение с нулевым напряжением, установленным путем заземления второго входа компаратора. В момент времени

$T_1 + T_2$  напряжение на выходе интегратора становится равным 0. В этот момент времени на выходе компаратора формируется импульс, который поступает на вход  $R$  триггера, и переводит триггер в состояние логического 0. Таким образом на выходе триггера формируется прямоугольный импульс длительностью  $T_2$ .

На основании изложенного можно записать

$$u_2(T_1 + T_2) = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1+T_2} u_1(t) dt = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1} U'_x dt + \frac{1}{RC} \int_0^{T_1+T_2} U_0 dt = 0,$$

откуда  $U'_x T_1 = U_0 T_2$ .

Измерение интервала  $T_2$  производится методом дискретного счета. Для этого прямоугольный импульс с выхода триггера поступает на схему логического «И» (&), на второй вход схемы «И» поступают импульсы от кварцевого генератора. Импульсы генератора, попавшие в выходной импульс триггера проходят на вход счетчика Ст и подсчитываются им. Таким образом  $T_2 = NT_0$ . На основании изложенного можно определить искомое напряжение

$$U'_x = N \frac{U_0}{k_d}, \quad U_x = U'_x / k, \quad U'_x = N \frac{U_0}{k_d} = N \cdot 10^{-m}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь коэффициент деления частоты  $k_d$ , значение опорного напряжения  $U_0$  и коэффициент  $k$ , определяющий предел измерений, выбраны кратными 10. Из формулы следует, что ни тактовая частота, ни постоянная интегрирования  $RC$  не влияют на результат. Поэтому в качестве тактового генератора может быть использован простой генератор импульсов без особых требований к их стабильности.

В окончательный результат входит не мгновенное значение преобразуемого напряжения, а среднее значение за время  $T_1$ . Поэтому переменное напряжение помехи, попадающее на вход АЦП, ослабляется, причем тем сильнее, чем выше его частота.

Основные слагаемые погрешности АЦП двойного интегрирования:

- погрешность установки опорного напряжения и его нестабильность;
- погрешность интегратора, вызывающая нелинейность напряжения на его выходе;
- погрешность сравнения напряжения в компараторе, его дрейф нуля;
- погрешность дискретности.

Вольтметры двойного интегрирования – наиболее популярная разновидность дешевых цифровых вольтметров и мультиметров. Погрешность их может достигать 0,02–0,05 % . Основное их достоинство – высокая помехоустойчивость.

## 2.2. Преобразователи электронных вольтметров

### 2.2.1. Параметры переменных напряжений

При измерении напряжений, меняющихся во времени, их характеризуют некоторыми средними величинами. Так, для напряжения  $u(t)$  вводят:

*среднее значение* (постоянная составляющая)

$$u_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt ,$$

где  $T$  – период для периодического напряжения или интервал наблюдения для непериодического напряжения;

*среднеквадратичное значение напряжения*

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt};$$

*средневыпрямленное значение напряжения*

$$U_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt .$$

Наряду с усредненными параметрами напряжение  $u(t)$  можно охарактеризовать максимальным (пиковым) значением на интервале наблюдения (рис. 2.3)  $U_m^+$  и  $U_m^-$ . Для гармонического напряжения эти значения равны и определяют амплитуду  $U_m$ .

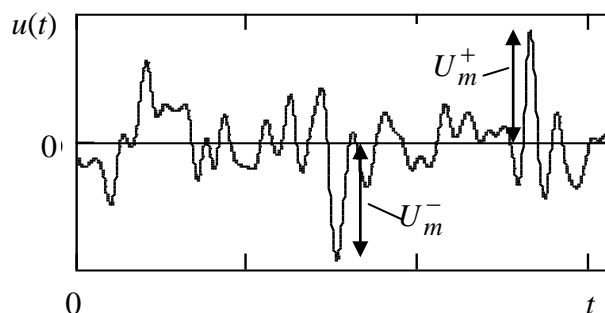


Рис. 2.3. Пиковое значение напряжения

Напряжение заданной формы можно охарактеризовать коэффициентом амплитуды  $k_a = U_m/U$  и коэффициентом формы  $k_f = U/U_{св}$ . Указанные коэффициенты позволяют, измерив одно из напряжений  $U_m$ ,  $U$  или  $U_{св}$ , рассчитать два оставшихся. Так для напряжения гармонической формы

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi) \quad k_a = 1,41, \text{ а } k_f = 1,11.$$

### 2.2.2. Преобразователи среднеквадратических значений напряжения

Для измерения вышеперечисленных параметров напряжения  $u(t)$  его преобразуют в соответствующее постоянное напряжение с помощью измерительных преобразователей. Такие преобразователи содержат нелинейный элемент.

В преобразователях среднеквадратичного значения напряжения переменное напряжение преобразуется в постоянную составляющую тока, пропорциональную среднеквадратическому значению напряжения  $U$  при любой его форме. Согласно определению среднеквадратичного значения напряжения соответствующий вольтметр должен выполнить следующие операции: возвести напряжения в квадрат, усреднить его и извлечь квадратный корень. Первую операцию осуществляет преобразователь, вторую – фильтр нижних частот или магнитоэлектрический измерительный механизм, третья операция выполняется обычно при калибровке вольтметра.

Квадратичная характеристика  $i = au^2$  создается в виде кусочно-линейной аппроксимации рис. 2.4 с помощью схемы, представленной на рис. 2.5. Напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  (рис. 2.5) создаются от источника питания  $E$  с помощью резистивных делителей и являются по отношению к диодам  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  запирающими ( $U_1 < U_2 < U_3$ ). Если подать на вход схемы гармоническое напряжение, то диоды  $D_{01}$  и  $D_{02}$  будут работать как двухполупериодный выпрямитель (полпериода открыт диод  $D_{01}$ , а следующие полпериода – диод  $D_{02}$ ). После диодов ток течет через сопротивление  $R_0$ , затем переменная составляющая тока течет через конденсатор  $C$ , а постоянная через магнитоэлектрический механизм  $\mu A$ . Так образуется участок вольтамперной характеристики на участке от  $-U_1$  до  $U_1$ . Если уровень входного напряжения превысит значение  $U_1$ , то откроется диод  $D_1$  и сопротивление  $R_0$  будет шунтировано сопротивлением  $R_1$ , что приведет к увеличению наклона вольтамперной характеристики на участке  $U_1 < |u| < U_2$  (рис. 2.4). Если уровень входного



напряжения превысит значение  $U_2$ , то дополнительно откроется диод  $D_2$  и сопротивление  $R_0$  будет шунтировано сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , наклон вольтамперной характеристики еще более возрастет, и т. д.

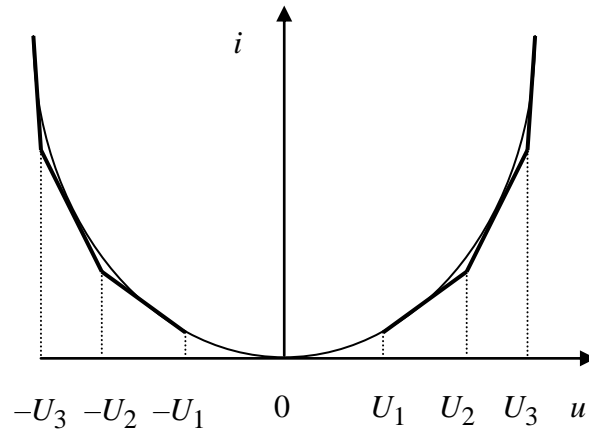


Рис. 2.4. Кусочно-линейная аппроксимация квадратичной характеристики

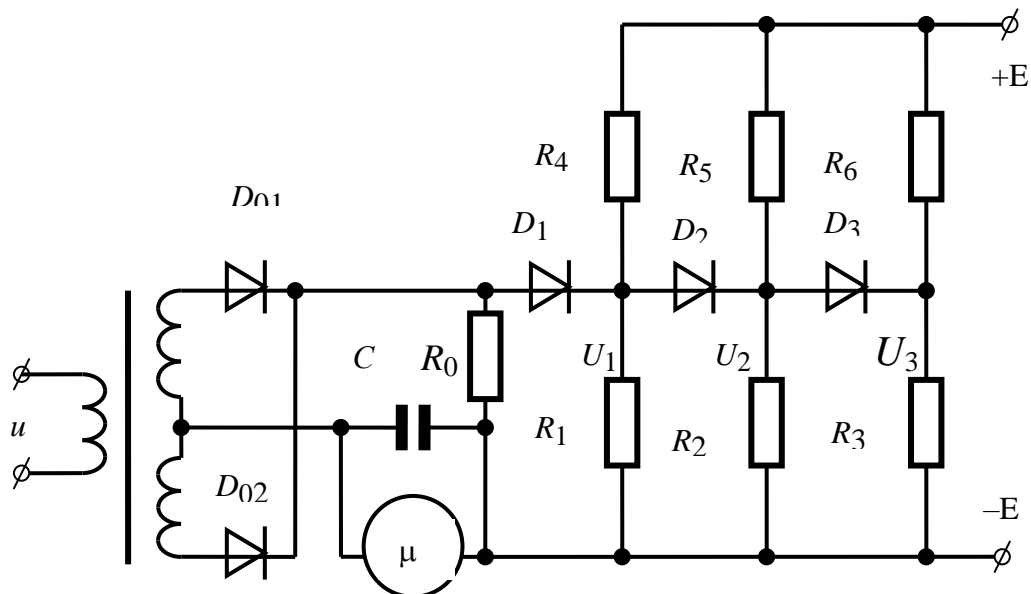


Рис. 2.5. Схема квадратичного преобразователя

В настоящее время для построения детекторов среднеквадратического значения широко используют аналоговые функциональные элементы – квадраторы (перемножители сигналов) и логарифмирующие усилители. В качестве примера рассмотрим схему среднеквадратического детектора, использующего логарифмические преобразования сигнала (рис. 2.6).

В детекторе реализуется следующая цепочка преобразований входного сигнала:

$$u(t) \rightarrow |u(t)| \rightarrow \ln |u(t)| \rightarrow 2 \ln |u(t)| \rightarrow \ln(u^2(t)) - \ln U = \ln \frac{u^2(t)}{U} \dots$$

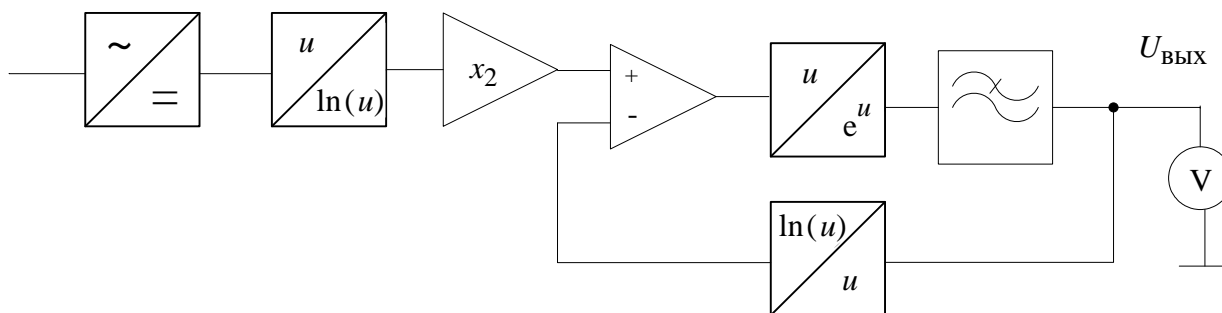


Рис. 2.6. Схема среднеквадратического детектора с логарифмическими преобразователями

$$\dots \rightarrow \exp\left(\ln \frac{u^2(t)}{U}\right) = \frac{u^2(t)}{U} \rightarrow \frac{1}{UT} \int_0^T [u(t)]^2 dt = U.$$

Входной сигнал выпрямляется и логарифмируется. Затем масштабный усилитель умножает его на два, что эквивалентно возведению в квадрат исходного напряжения. Дифференциальный усилитель осуществляет обратную связь, вычитая из логарифма квадрата напряжения логарифм выходного напряжения детектора  $U$ . Это эквивалентно делению квадрата напряжения на выходное напряжение. Осуществляя операцию антилогарифмирования и усредняя результат интегратором (ФНЧ), получаем постоянное напряжение, равное среднеквадратическому значению входного сигнала. Такой детектор обеспечивает широкий динамический диапазон и высокую точность преобразования. Его частотные свойства определяются широкополосностью элементов схемы.

Такие схемы применяют для измерения среднеквадратического значения (СКЗ) шумовых сигналов. Они обычно имеют высокий пик-фактор (большое отношение пикового значения к СКЗ), широкий частотный спектр. Для них используют широкополосные вольтметры с расширенным динамическим диапазоном. Для усреднения таких сигналов требуется обычно увеличенное время интегрирования (сглаживания).

В данной лабораторной работе измеряется среднеквадратическое значение шумового напряжения, имеющего равномерное распределение в интервале напряжений от  $-U_m$  до  $U_m$  и представленное на рис. 2.7. Дисперсия такого распределения равна  $D = \sigma^2 = U_m^2/3$ . Соответственно, среднеквадратичное значение напряжения шума равно  $\sigma = U_m/\sqrt{3}$ .

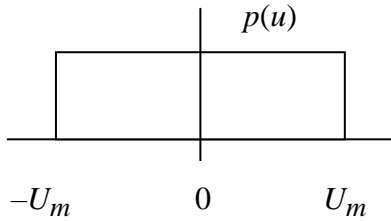


Рис. 2.7. Равномерное распределение

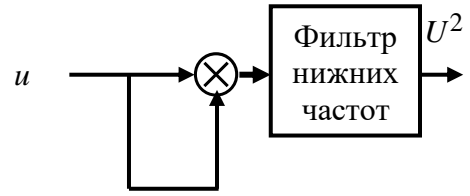


Рис. 2.8. Преобразователь с множителем

Для формирования среднего квадрата переменного напряжения  $U^2$  можно использовать схему с множителем напряжения и его усреднением с помощью фильтра нижних частот (рис. 2.8). Для формирования среднеквадратичного напряжения  $U$  применяют логарифмическое преобразование, делитель и экспоненциальное преобразование.

### 2.2.3. Преобразователи средневыпрямленных значений напряжения

В преобразователях средневыпрямленного значения напряжения показания соответствуют средневыпрямленному значению напряжения  $U_{св}$ . Схема преобразователя представлена на рис. 2.9.

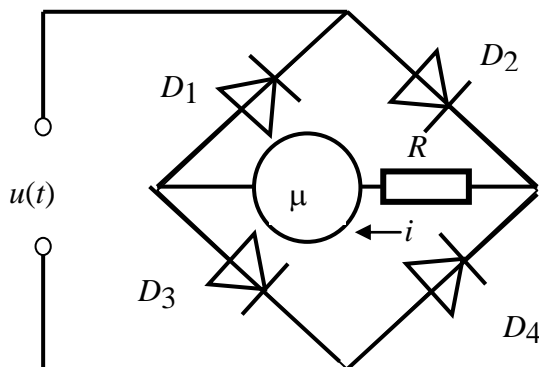


Рис. 2.9. Преобразователь средневыпрямленного значения напряжения

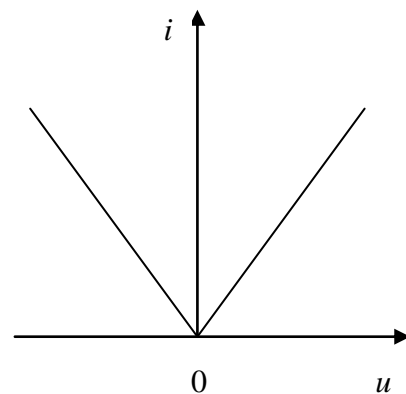


Рис. 2.10. Вольтамперная характеристика преобразователя

Ток через микроамперметр протекает в одном и том же направлении в течение обоих полупериодов переменного напряжения (в положительный полупериод по цепи  $D_2-R-D_3$ , а в отрицательный – по цепи  $D_4-R-D_1$ ). При использовании линейного участка сопротивления диода (рис. 2.10) показания микроамперметра будут пропорциональны средневыпрямленному значению напряжения  $U_{св}$ .

### 2.2.4. Преобразователи пикового значения напряжения

В вольтметрах амплитудного значения измеряемое переменное напряжение преобразуется в постоянное напряжение, равное (близкое) амплитудному. На рис. 2.11 и 2.12 представлены простейшие схемы преобразователей амплитудных вольтметров.

На рис. 2.11 представлен преобразователь последовательного типа с открытым входом. Если на вход подано гармоническое напряжение  $u(t) = U_m \sin \omega t$  (рис. 2.13), то конденсатор  $C$  будет заряжаться током заряда  $i_3$  через внутреннее сопротивление источника  $R_i$  и открытый диод  $D$ .

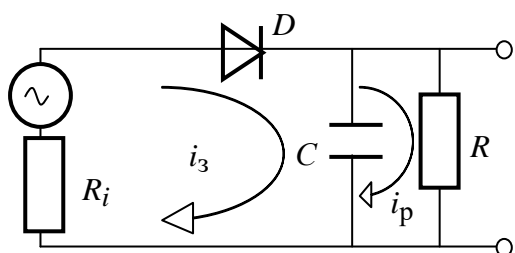


Рис. 2.11. Преобразователь открытого типа

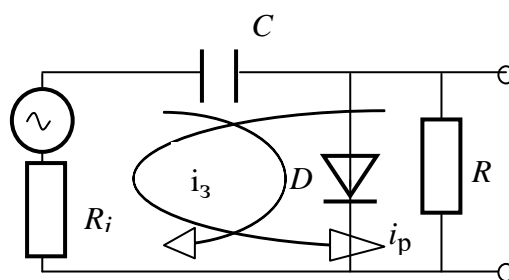


Рис. 2.12. Преобразователь закрытого типа

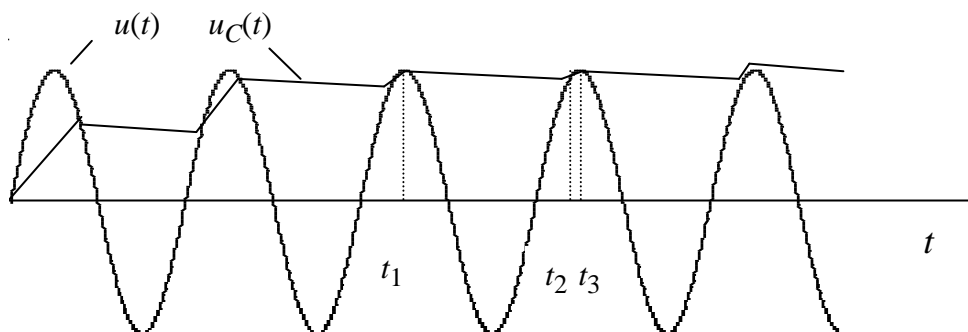


Рис. 2.13. Временные диаграммы входного напряжения и напряжения на конденсаторе

Скорость заряда определяется постоянной времени заряда  $\tau_3 = R_i C$ . На интервалах времени, когда напряжение на конденсаторе больше входного напряжения, диод закрывается и происходит разряд емкости током  $i_p$  с постоянной времени разряда  $\tau_p = RC$ . Если  $\tau_3 \ll T$  ( $T$  – период гармонического напряжения), а  $\tau_p \gg T$ , то напряжение на конденсаторе  $u_C(t)$  будет близко к амплитудному значению входного напряжения  $U_m$ . Это напряжение будет уже практически постоянным.

Однако на низких частотах могут возникнуть значительные погрешности. Так, для схемы с открытым входом на интервале от  $t_1$  до  $t_2$  происходит разряд конденсатора и напряжение на нем падает по закону

$$u_C(t) = U_m e^{-(t-t_1)/\tau_p} \approx U_m \left( 1 - \frac{t-t_1}{\tau_p} \right).$$

На интервале от  $t_2$  до  $t_3$  конденсатор подзаряжается до амплитудного значения  $U_m$ . В силу малости длительности этого интервала по сравнению с периодом  $T$  можно рассчитать среднее за период напряжение на конденсаторе

$$\begin{aligned} U_{C_0} &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} U_C(t) dt \approx \frac{U_m}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left( 1 - \frac{t-t_1}{\tau_p} \right) dt = \frac{U_m}{T} \left[ t_2 - t_1 - \frac{(t_2 - t_1)^2}{2\tau_p} \right] \approx \\ &\approx \frac{U_m}{T} \left( T - \frac{T^2}{2\tau_p} \right) = U_m \left( 1 - \frac{T}{2\tau_p} \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

При  $T/2\tau_p \ll 1$   $U_{C_0} \approx U_m$ . Однако на низких частотах это неравенство не выполняется и возникает погрешность измерения амплитуды.

Если подать на преобразователь открытого типа импульсное напряжение (рис. 2.14), то при выполнении условий  $\tau_3 \ll \tau$  ( $\tau$  – длительность импульса) и  $\tau_p \gg T$  напряжение на выходе будет близко к амплитудному значению  $U_m$ .

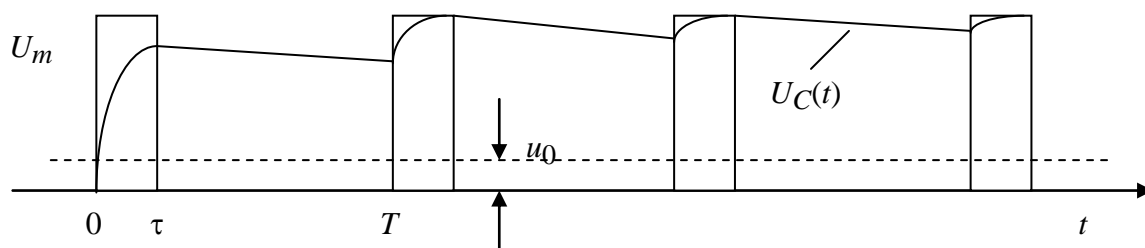


Рис. 2.14. Импульсное напряжение и напряжение на конденсаторе

Во время действия импульса длительностью  $\tau$  напряжение на конденсаторе изменяется и в момент окончания импульса становится равным

$$u_C(\tau) = U_m (1 - \exp(-\tau/\tau_3)), \quad (2.2)$$

где  $\tau_3 = R_i C$  – постоянная времени цепи заряда конденсатора.

Рассмотренное импульсное напряжение содержит постоянную составляющую  $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = U_m \frac{\tau}{T}$ . Выходное напряжение преобразователя

закрытого типа  $u_R(t) = u(t) - u_C(t)$ . Поскольку  $u_C \approx U_m$ , то  $u_R(t)$  будет иметь вид, представленный на рис. 2.15. Электромеханический измерительный механизм измерит постоянную составляющую этого напряжения

$$\frac{1}{T} \int_{\tau}^T u(t) dt = U_m \left( 1 - \frac{\tau}{T} \right).$$

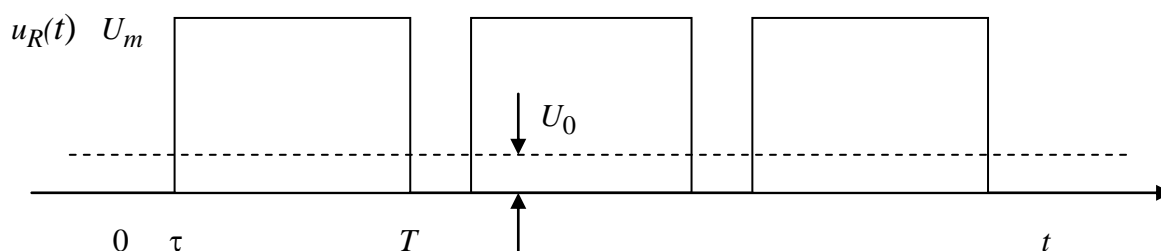


Рис. 2.15. Напряжение на резисторе

В результате вместо амплитуды импульса  $U_m$  будет измерено значение  $U_m - U_0$ . То есть преобразователь закрытого типа не пропускает постоянную составляющую напряжения.

### 2.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 2.16) состоит из цифрового вольтметра GDM-8246, генератора сигналов специальной формы АКИП-3407/4, осциллографа GOS-620 для наблюдения формы исследуемых напряжений и лабораторного макета преобразователей переменного напряжения в постоянное напряжение, численно равное среднеквадратическому, средневыпрямленному или пиковому напряжению. Выбор соответствующего преобразователя осуществляется переключателем макета (*Пик*, *СВ*, *СК*). В положении *Пр* (прямое соединение) напряжение генератора напрямую поступает на вольтметр, минуя преобразователи). На макете также имеется переключатель *открытого* или *закрытого* входа. В последнем случае на входе макета подключается разделительный конденсатор, препятствующий прохождению постоянной составляющей входного напряжения.

**Цифровой вольтметр GDM-8246** предназначен для измерения постоянного напряжения, а также для измерения среднеквадратического значения

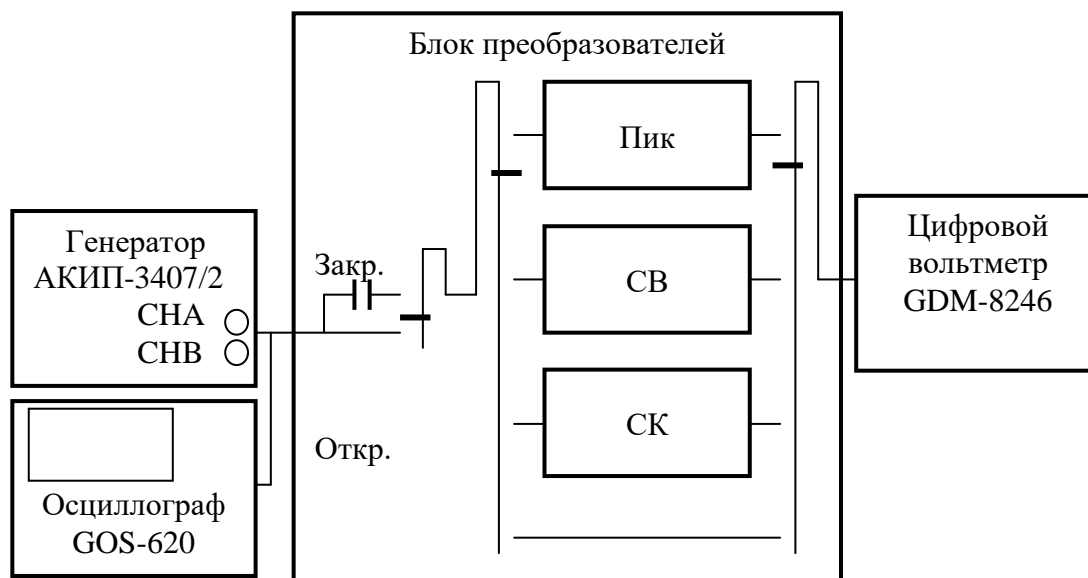


Рис. 2.16. Структурная схема лабораторной установки

переменного напряжения. Входное сопротивление вольтметра – 10 МОм. Входная емкость – не более 100 пФ.

При расчете погрешностей измерения постоянных напряжений следует использовать табл. 2.1.

Таблица 2.1

Предел	Разрешение (значение единицы младшего разряда)	Абсолютная погрешность <sup>1</sup>
500 мВ	10 мкВ	$\pm(0,0002 \cdot X + 4 \cdot k)$
5 В	100 мкВ	$\pm(0,0002 \cdot X + 2 \cdot k)$

<sup>1</sup>Здесь  $X$  – измеренное значение,  $k$  – разрешение (оба слагаемых должны быть выражены в одинаковых единицах).

Таблица 2.2

Предел	Полоса частот	Разрешение	Абсолютная погрешность
500 мВ	20...50 Гц	10 мкВ	$\pm(0,01 \cdot X + 10 \cdot k)$
	50 Гц...2 кГц		$\pm(0,003 \cdot X + 30 \cdot k)$
	2...10 кГц		$\pm(0,004 \cdot X + 50 \cdot k)$
	10...20 кГц		$\pm(0,005 \cdot X + 50 \cdot k)$
	20...50 кГц		$\pm(0,02 \cdot X + 20 \cdot k)$
	50...100 кГц		$\pm(0,005 \cdot X + 50 \cdot k)$
5 В	20...50 Гц		$\pm(0,01 \cdot X + 10 \cdot k)$
	50 Гц...2 кГц		$\pm(0,003 \cdot X + 30 \cdot k)$
	2...10 кГц		$\pm(0,004 \cdot X + 50 \cdot k)$
	10...20 кГц		$\pm(0,005 \cdot X + 50 \cdot k)$
	20...50 кГц		$\pm(0,02 \cdot X + 20 \cdot k)$
	50...100 кГц		$\pm(0,005 \cdot X + 50 \cdot k)$

При расчете погрешностей измерения переменных напряжений следует использовать табл. 2.2.

Назначение основных органов управления вольтметром указано в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Обозначение	Назначение
POWER	Включение-выключение питания
DCV/DCmV	[DCV] выбор режима измерения постоянного напряжения (более 500 мВ) [DCmV] выбор режима измерения постоянного напряжения (менее 500 мВ)
ACV/ACmV	[ACV] выбор режима измерения переменного напряжения (более 500 мВ) [ACmV] выбор режима измерения переменного напряжения (менее 500 мВ)
AUTO/MAN	Переключение автоматический, ручной выбор предела измерений
SHIFT	Кнопка-префикс

**Генератор сигналов специальной формы АКИП-3407/4** имеет 2 канала А и В, выходы которых подключаются нажатием клавиш *CHA Output* или *CHB Output*. Генератор может формировать напряжения различной формы, при этом можно изменять уровень напряжения, его частоту и ряд других параметров. Режимы работы генератора и параметры вырабатываемых сигналов отображаются на дисплее: в левой части дисплея отображается форма сигнала канала А (*CH A*). В центральной верхней части дисплея отображается форма сигнала канала В (*CH B*).

Для установки требуемого параметра сигнала генератора необходимо нажать один или несколько раз соответствующую клавишу, например *Amplitude*. Затем набрать с помощью цифровой клавиатуры численное значение параметра, например 2.583. Завершить ввод следует нажатием клавиши размерности параметра, например  $V_{pp}$  или в случае частоты – *kHz*. Для изменения численного значения параметра можно также вращать круглый регулятор в правом верхнем углу лицевой панели генератора. Кнопками ◀ и ▶ выберите разряд на цифровом индикаторе, с шагом которого будет изменяться значение параметра при вращении ручки. Значение параметра можно изменять также кнопками ▲ и ▼.

Для наблюдения формы напряжения, вырабатываемого генератором используется осциллограф GOS-620. При этом регулировка параметров осциллограммы осуществляется ручками *VOLTS/DIV* (вольт на деление) и *TIME/DIV* (время на деление). Для синхронизации осциллограммы необходимо вращать ручку *LEVEL* (уровень).



## 2.4. Задание и указания к выполнению работы

### 2.4.1. Измерение постоянных напряжений

Соедините через тройник кабелем выход канала *B* генератора АКИП-3407/4 с разъемом *Вход* макета и входом *CH1* осциллографа. *Выход* макета соедините с соответствующими входными клеммами вольтметра GDM-8246: черный (синий) провод – с клеммой «земля», белый (красный) провод – с клеммой *V*. Установите переключатели макета в положения *Пр* и *Откр.* Включить питание вольтметра и нажать кнопку *DCV*. Включить питание генератора. Нажатием на нем кнопки *Channel* и добиться появления на дисплее появления надписи *CHB Alone* (канал *B* один). Нажать кнопку *Wave* и изменить вид напряжения генератора на постоянное напряжения (*B09*). Для этого можно вращать регулятор в правом верхнем углу лицевой панели генератора. Нажать кнопку *Amplitude* и установить значение постоянного напряжения генератора  $2 V_{pp}$  (постоянное напряжение 1 В).

Включить питание осциллографа и установить органы его управления в следующие положения:

*CH1 X*: в положение *DC* (открытый вход);

*MODE: CH1*;

*TRIGGER: MODE AUTO*,

*SOURCE CH1*;

*VOLTS/DIV 1 V/DIV*.

Нажать кнопку *CHB Output* (при этом кнопка засветится и напряжение с генератора поступит на вольтметр). Линия развертки на экране осциллографа при этом сместится на 1 деление вверх, что соответствует постоянному напряжению 1 В. Провести измерение напряжения и записать результат в таблицу. Повторить измерения для напряжений, указанных в табл. 2.2.

Рассчитать погрешность измерения  $\Delta$  и предел абсолютной погрешности измерения напряжения, воспользовавшись данными табл. 2.1, после чего сопоставить их значения.

### 2.4.2. Измерение параметров гармонического (синусоидального) напряжения

Нажмите клавишу *CHB Output* (индикатор погаснет), тем самым выход генератора будет отключен. Переключатель макета установите в положение *Открытый* и *СК*, что соответствует измерению среднеквадратического напряжения. Включите питание макета. Нажмите клавишу *Wave* на генерато-

ре и установите синусоидальную форму сигнала (B00 Sine). Нажав клавишу *Frequency* установите частоту сигнала генератора  $1\text{ kHz}$ . Нажав кнопку *Amplitude* установите амплитуду сигнала генератора  $2V_{pp}$  (истинная амплитуда  $1\text{ В}$ ). На вольтметре нажмите клавишу *DCV* (для измерения постоянного напряжения на выходе макета). Подайте напряжение с генератора на вход макета нажатием клавиши *CHB Output* (индикатор загорится). На осциллографе установите коэффициент развертки *TIME/DIV*  $.2\text{ ms/DIV}$  ( $0,2\text{ мс/дел}$ ). Вращением ручки *LEVEL* добейтесь неподвижного изображения синусоидального напряжения на экране осциллографа. В дальнейшем при изменении частоты напряжения регулируйте коэффициент развертки *TIME/DIV*, чтобы на экране было видно 3–8 периодов напряжения. Проведите измерение среднеквадратических значений гармонического напряжения на частотах, указанных в табл. 2.4. При изменении частоты генератора необходимо нажать на нем клавишу *Frequency*.

Переведите переключатель макета в положение *CB* и проведите измерения средневыпрямленного напряжения гармонического сигнала на частотах, указанных в табл. 2.4.

Переведите переключатель макета в положение *Пик* и проведите измерения амплитудного значения напряжения гармонического сигнала на частотах, указанных в табл. 2.4.

Проведите расчет амплитуды на выходе преобразователя пикового напряжения по формуле (2.1), полагая  $\tau_p = RC = 1\text{ мс}$ ;  $T = 1/f$ . Постройте графики экспериментальных и расчетной зависимостей параметров напряжения по данным табл. 2.4. При построении графиков используйте логарифмический масштаб по частотной оси. Эта процедура описана в прил. 3

Нажмите кнопку *Frequency* и установите частоту сигнала  $100\text{ кГц}$ . Проведите измерение параметров гармонического напряжения для амплитуд  $U_m$ , указанных в табл. 2.5. Для этого нажмите на генераторе кнопку *Amplitude* и установите напряжение  $V_{pp} = 2U_m$ . Для измерения  $U_{ск}$ ,  $U_{св}$  и  $U_{пик}$  используйте переключатель на макете преобразователей. Расчетные значения параметров напряжения определите через коэффициенты амплитуды и формы гармонического сигнала ( $k_a = 1,41$ , а  $k_\phi = 1,11$ ) и заданное значение  $U_m$ .

Нажмите клавишу *CHB Output* (индикатор погаснет), тем самым выход генератора будет отключен.

### 2.4.3. Измерение параметров периодических несинусоидальных напряжений

Нажмите кнопку *Frequency* и установите частоту сигнала  $f = 50$  кГц. При этом период сигнала будет равен  $T = 1/f = 20$  мкс. Нажмите на генераторе кнопку выбора формы сигнала *Wave* и установите прямоугольную форму напряжения (B01). Форму напряжения проверяйте на экране осциллографа, регулируйте при этом масштаб ручками *VOLTS/DIV* и *TIME/DIV*. Для установления синхронизации используйте ручку *LEVEL*. Для этого можно вращать регулятор в правом верхнем углу лицевой панели генератора. Нажав кнопку *Amplitude*, установите амплитуду сигнала генератора  $2V_{pp}$  ( $U_m = 1$  В). При этом параметр  $\tau/T$  (Duty) равен 50 %. Подайте напряжения с генератора на вход макета нажатием клавиши *CHB Output* (индикатор загорится). Результаты измерений занесите в табл. 2.6.

Проведите измерения параметров напряжений треугольной (B02), пилообразной (B03) и импульсной (B05) формы. Результаты измерений занесите в табл. 2.6. По результатам измерений рассчитайте  $k_a$  и  $k_f$  для каждой формы напряжения и сравните их с теоретическими значениями.

### 2.4.4. Исследование показаний преобразователей в режимах открытого и закрытого входов

Переключите тройник с выхода *B* на выход канала *A* генератора. Нажмите на генераторе кнопку *Channel* и добейтесь появления на дисплее появления надписи *CHA Alone* (канал *A* один). Нажмите на кнопку *A*  $\wedge$  и установите тем самым синусоидальную форму напряжения генератора. Нажмите на кнопку *Frequency* и установите частоту генератора 20 кГц. После нажатия кнопки *Amplitude* установите напряжение  $V_{pp} = 2U_m$  равным 4 В. Нажмите клавишу *CHA Output* и напряжение с генератора поступит на блок преобразователей. На экране осциллографа должно появиться изображение синусоидального напряжения. Добавьте к синусоидальному напряжению постоянное напряжение  $U_0 = 2$  В. Для этого нажмите кнопку *Offset* и установите смещение 2 В. При этом фактическое напряжения генератора будет равно  $u(t) = 2\sin\omega t + 2$  В. Осциллограмма на экране осциллографа сместится вверх. Используя переключатели макета, проведите измерение параметров поданного напряжения в режимах открытого и закрытого входов. Результаты занесите в табл. 2.7.

Нажмите на кнопку А  $\square$  и установите тем самым прямоугольную форму напряжения генератора. Нажмите на кнопку *Frequency* и установите частоту генератора 50 кГц. После нажатия кнопки *Amplitude* установите напряжение  $V_{pp} = 2U_m$  равным 1 В. Нажатием кнопки *Impedance* добейтесь проявления надписи *Duty*, после чего установите этот параметр равным 10 %. Проконтролируйте форму напряжения на экране осциллографа. Переключатели блока преобразователей установите в положение *Пик*. При этом генератор будет формировать напряжение, вид которого представлен на рис. 2.17. Отношение  $T/\tau = q$  называют скважностью. Обратная величина  $\tau/T = D$  (*Duty*). При заданной частоте с изменением *Duty* период не меняется, а меняется длительность  $\tau$ . Рассматриваемый сигнал содержит постоянную составляющую

$$U_0 = U_m(2D - 1).$$

Проведите измерения амплитуды импульса с помощью преобразователя пикового значения напряжения в режимах открытого и закрытого входов преобразователя для параметров *Duty* указанных в табл. 2.8.

#### 2.4.5. Исследование влияния постоянной заряда на показания преобразователя пикового значения напряжения

Нажмите на кнопку А  $\square$  и установите тем самым прямоугольную форму напряжения генератора. Нажмите на кнопку *Frequency* и установите частоту генератора 15 кГц. После нажатия кнопки *Amplitude* установите напряжение  $V_{pp} = 2U_m$  равным 1 В. Нажмите кнопку *Offset* и установите смещение 0 В. Нажав клавишу *Duty*, установите этот параметр равным 10 %. Переключатели блока преобразователей установите в положение *Открытый вход* и *Пик*. При этом генератор будет формировать напряжение, вид которого представлен на рис. 2.14. Сравните его с изображением на осциллографе.

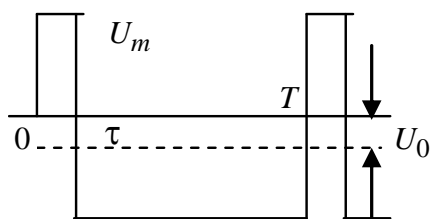


Рис. 2.17. Напряжение прямоугольной формы

Проведите измерения амплитуды импульса  $U_m$  с помощью преобразователя пикового значения напряжения при различных значениях *Duty* и результаты занесите в табл. 2.9.

Проведите расчет пикового значения напряжения по формуле (2.2), приняв при этом  $R_i = 50$  Ом, а  $C = 1$  нФ. Постройте графики результатов эксперимента и расчета по табл. 2.9.

Нажмите клавишу *CHA Output* (индикатор погаснет), тем самым выход генератора будет отключен.

#### **2.4.6. Измерение среднеквадратических напряжений вольтметром GDM-8246**

Переключите тройник с выхода *A* на выход канала *B* генератора АКИП-3407/4. На макете установите переключатель в положение *Pr*. Нажмите на вольтметре кнопку *ACV* (измерение среднеквадратического напряжения с помощью собственного преобразователя вольтметра). Нажмите на нем кнопку *Channel* и добейтесь появления на дисплее появления надписи *CHB Alone* (канал *B* один). Нажмите кнопку *Wave* и измените вид напряжения генератора на синусоидальное напряжение (*B00*). Для этого можно вращать регулятор в правом верхнем углу лицевой панели генератора. Нажмите кнопку *Amplitude* и установите значение напряжения генератора  $1 V_{pp}$  ( $U_m = 0,5 \text{ В}$ ). Нажмите на кнопку *Frequency* и установите частоту генератора  $15 \text{ кГц}$ . Нажмите кнопку *CHB Output* (при этом кнопка засветится и напряжение с генератора поступит на вольтметр). Проведите измерение среднеквадратического напряжения и запишите результат в таблицу. Повторите измерения для напряжений, указанных в табл. 2.10.

Рассчитайте погрешность измерения и предел абсолютной погрешности измерений напряжения, воспользовавшись данными табл. 2.2. При этом сначала определите установленное на генераторе среднеквадратическое значение напряжения  $U_{СК}$  через коэффициент амплитуды  $k_a$  (см. табл. 2.6), для синусоидального напряжения  $k_a = 1,41$ , для шума с равномерным распределением  $k_a = 1,733$ . Погрешность измерения – разность среднеквадратических значений напряжения, установленных на генераторе и измеренных значений.

#### **2.4.7. Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

- краткие теоретические сведения о вольтметрах и параметрах измеряемых переменных напряжений;
- таблицы результатов измерений по установленной форме с внесенными расчетами; графики экспериментальных измерений и расчетных зависимостей (см. 2.4.2, 2.4.5);
- выводы.

### 2.4.8. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 2.3

Установленное на генераторе напряжение, $V_{pp}$	Установленное напряжение, $U_y = V_{pp}/2$	Измеренное напряжение $U_{и}$ , В, (*-мВ)	Погрешность измерения $\Delta = U_y - U_{и}$ , мВ	Предел абсолютной погрешности, мВ
2 В	1 В			
1 В	0,5 В			
500 мВ	0,250 В			
500 мВ	250 мВ (*)			
250 мВ	125 мВ (*)			
100 мВ	50 мВ (*)			

(\*) – перейти с вольтового предела измерений вольтметра на милливольтовый, для чего на вольтметре нажать клавишу *SHIFT*, а затем *DCmV*.

Таблица 2.4

$U$	$f$ , кГц								
	1	5	10	50	100	200	300	400	500
$U_{ск}$									
$U_{св}$									
$U_{пик}$									
$U_{пик}$ расчет									

Таблица 2.5

$U$ , В		$V_{pp}$ , В			
		0,2	0,4	1,0	2,0
$U_{ск}$	измеренное				
	расчетное				
$U_{св}$	измеренное				
	расчетное				
$U_{пик}$	измеренное				
	расчетное ( $U_m$ )	0,1	0,2	0,5	1,0

Таблица 2.6

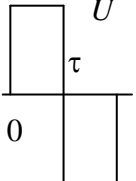
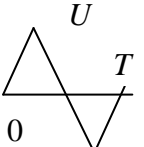
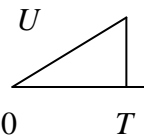
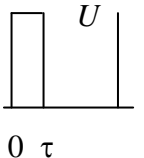
Вид сигнала (один период)	Номер сигнала	$U_{ск}, В$	$U_{св}, В$	$U_{пик}, В$	$k_a$		$k_\phi$	
					изм.	теор.	изм.	теор.
	B01					1		1
	B02					1,733		1,155
	B03					1,733		1,155
	B05					$\sqrt{T/\tau} = 2,83$		$\sqrt{T/\tau} = 2,83$

Таблица 2.7

Переключатель	$U_{ск}, В$	$U_{св}, В$	$U_{пик}, В$
Открытый вход			
Закрытый вход			

Таблица 2.8

$U_{пик}, В$	$D, \%$		
	10	50	80
Открытый вход			
Закрытый вход			

Таблица 2.9

$U_{пик}, В$	$D, \%$						
	10	1,0	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Измеренное							
Расчет							

Таблица 2.10

Параметры генератора				Результаты измерений		
Форма сигнала	$V_{pp} = 2U_m$	Частота, кГц	$U_{ск} = U_m/k_a$ , В, мВ	$U_{ск}$ , В, мВ	Погрешность измерения ( $\Delta = U_y - U_x$ ), мВ	Предел абсолютной погрешности, мВ
Синус (B00)	1 В	15				
Меандр (B01)	250 мВ (*)	4				
Треугольный (B02)	300 мВ (*)	70				
Пилообразный (B03)	400 мВ (*)	30				
Шум (B21)	1 В	1				

(\*) – перейти с вольтового предела измерений вольтметра на милливольтный, для чего на вольтметре нажать клавишу *SHIFT*, а затем клавишу *ACmV*.

#### 2.4.9. Контрольные вопросы

1. Перечислите преимущества цифровых вольтметров перед аналоговыми и приведите основные параметры цифровых вольтметров.
2. Объясните принцип действия цифровых вольтметров двойного интегрирования.
3. Какие параметры используют при измерении переменных напряжений?
4. Что представляют собой преобразователи среднеквадратического значения напряжения и как они работают?
5. Что представляют собой преобразователи средневыпрямленного значения напряжения и как они работают?
6. Что представляют собой преобразователи пикового значения напряжения и как они работают?
7. Чем обусловлена низкочастотная погрешность вольтметра пикового значения напряжения?
8. Почему падают показания вольтметра пикового значения напряжения при малых длительностях импульсов?
9. Что такое «открытый» и «закрытый» входы вольтметра и как их можно использовать?
10. Объясните результаты измерений в табл. 2.7.
11. Почему при разных значениях параметра  $D$  меняется  $U_{пик}$  (табл. 2.8) в режиме закрытого входа, а при открытом входе остается постоянным?
12. Соответствуют ли результаты измерений среднеквадратических значений напряжения установленным параметрам  $V_{pp}$  в табл. 2.10?
13. Как рассчитываются погрешности вольтметра при измерении постоянных и переменных напряжений?



### 3. 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.

#### 3.1. 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 представлена на рис. 3.1. Она включает в себя каналы вертикального ( $Y$ ) и горизонтального ( $X$ ) отклонений; канал  $Z$ , служащий для модуляции яркости 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 уровня, удобного для наблюдения на экране ЭЛТ, и включает калиброванный аттенюатор, предварительный усилитель, линию задержки и окончательный усилитель.

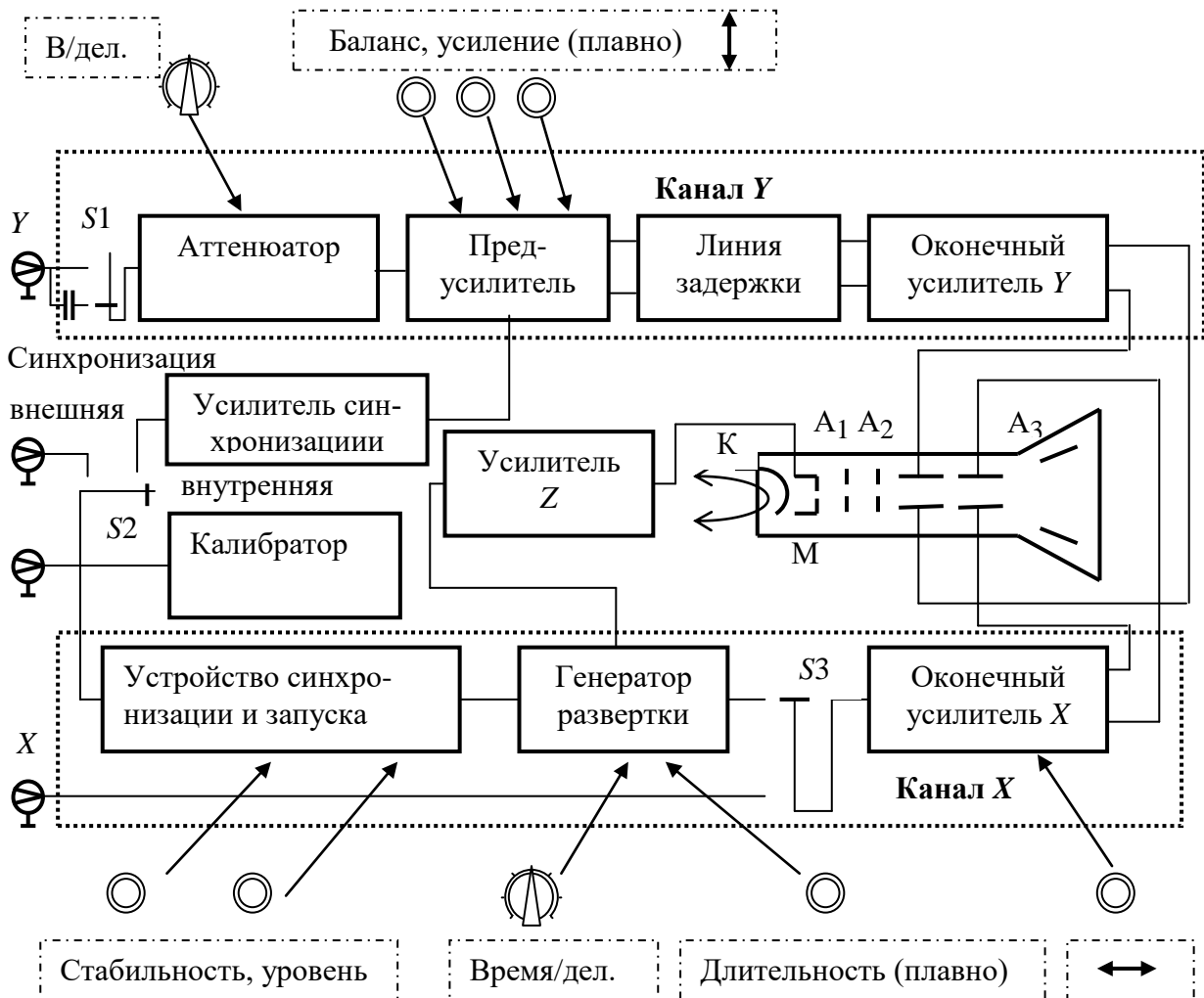


Рис. 3.1. Структурная схема универсального осциллографа

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. Здесь же осуществляется смещение осциллограммы по вертикали  $\uparrow$  (в некоторых осциллографах эта регулировка осуществляется в оконечном усилителе).

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 *У* увеличивает сигнал до уровня, позволяющего получить достаточный размер сигнала по вертикали на экране ЭЛТ. Кроме того, оконечный усилитель обеспечивает симметричный выход для подачи напряжения на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Это означает, что напряжение на верхней пластине положительно относительно земляной шины, а на нижней – отрицательно. В отличие от этого входное напряжение осциллографа поступает на вход в несимметричном виде, т. е. определяется относительно земляной шины.

Канал горизонтального отклонения предназначен для создания развертываемого напряжения, синхронного с исследуемым сигналом, и включает устройство синхронизации и запуска, генератор развертки, оконечный усилитель *Х*.

Устройство синхронизации и запуска может работать в режиме внутренней синхронизации от исследуемого сигнала, поступающего из канала *У* 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. 3.2).

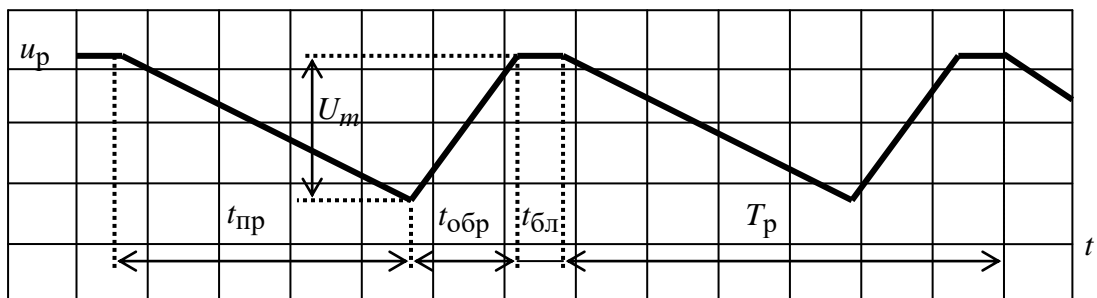


Рис. 3.2. Временная диаграмма напряжения генератора развертки

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. 3.3 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 производится регулировка смещения осциллограммы по горизонтали ручкой  $\leftrightarrow$ . В ряде осциллографов предусматривается возможность подачи на X-канал внешних сигналов (XY-режим) с помощью переключателя S3. Генератор развертки при этом отключают.

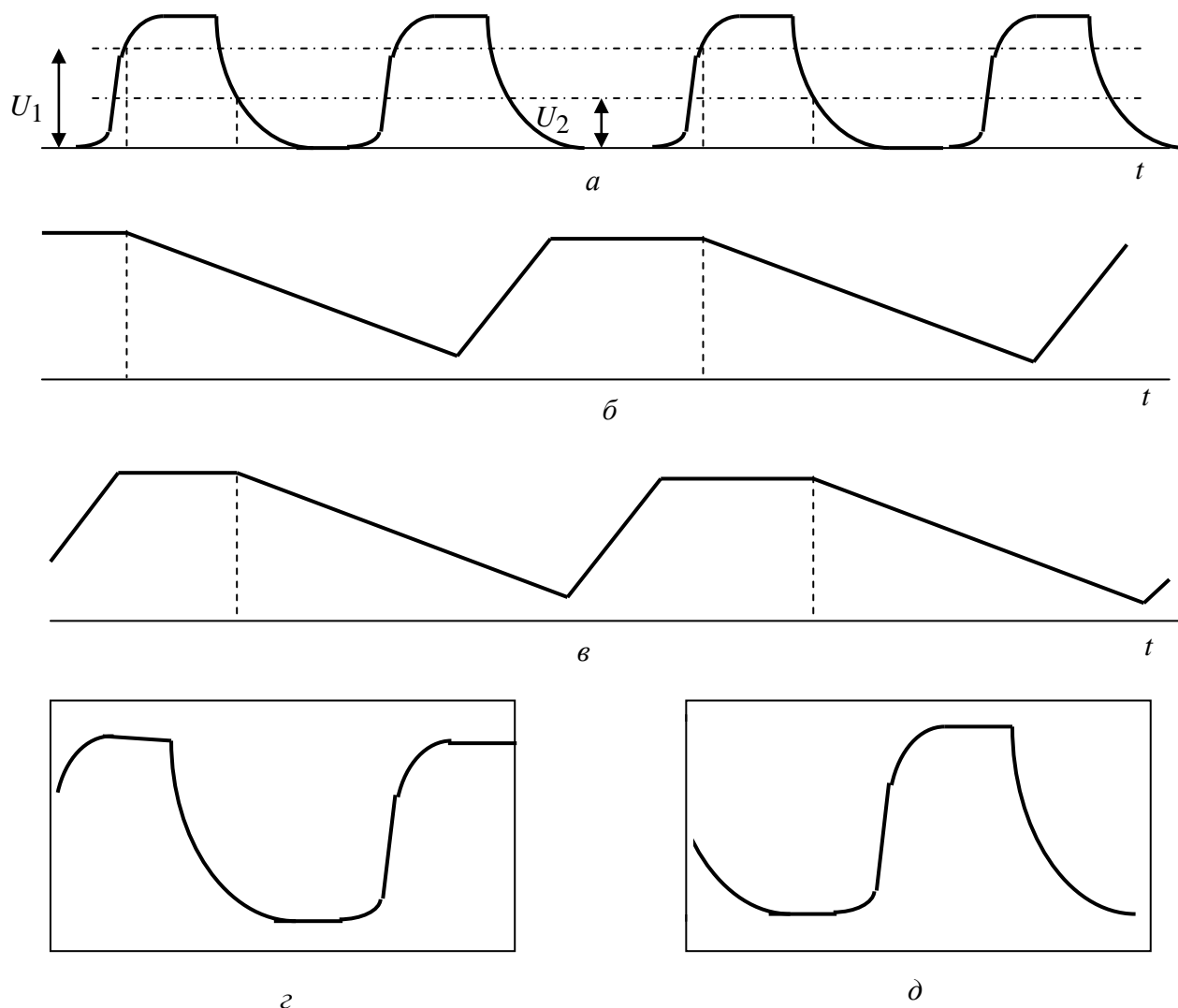


Рис. 3.3. Временные диаграммы исследуемого сигнала (*a*), напряжение генератора развертки при запуске по положительному перепаду (+) от уровня  $U_1$  (*б*), напряжение генератора развертки при запуске по отрицательному перепаду (-) от уровня  $U_2$  (*в*), а также вид соответствующих осциллограмм на экране осциллографа (*з*) и (*д*)

Усилитель канала  $Z$  усиливает импульсы, поступающие от генератора развертки на модулятор ЭЛТ, чем обеспечивает подсветку траектории луча во время прямого хода развертки. При этом длительность импульса подсветки 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  $F_K = 1/T_K$ ).

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  $Y1$  и  $Y2$ .

### 3.2. 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 (0,707) от ее значения на опорной (относительно низкой) частоте. Полоса пропускания задается верхней граничной частотой  $f_B$ . Рабочий диапазон частот осциллографа обычно меньше и определяется граничной частотой  $f_{Гр}$ , на которой коэффициент отклонения составляет 0,95 от значения на опорной частоте.

*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* канала  $Y$  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  $K_0$*  – 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 аттенюаторе.

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 изменением длительности прямого хода  $t_{пр}$  генератора развертки.

### 3.3. 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, выраженный в делениях шкалы осциллографа,  $K_o$  – коэффициент отклонения, выраженный в В/дел. или мВ/ дел.

Аналогично измеряется временной интервал  $T = a K_p$ , где  $a$  – отсчитанный размер изображения по горизонтали, выраженный в делениях,  $K_p$  – коэффициент развертки, выраженный в мс/дел. или мкс/дел.

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 измеряемый временной интервал определяется соотношением  $T = a K_p M$ . Обычно множитель растяжки  $M = 0,1$  или  $0,2$ .

### 3.4. Задание и указания к выполнению работы

#### 3.4.1. Измерение параметров напряжения развертки осциллографа С1-65

Установите органы управления осциллографов в следующие положения:

С1-65: РАЗВЕРТКА:  $\times 1$ ;  $0,1 \mu\text{с}/\text{дел.}$ , АВТ (знак **Z**),

СИНХРОНИЗАЦИЯ: ВНУТР, +,  $\sim$ ;

С1-82: УСИЛИТЕЛЬ Y2:  $2 \text{ V}/\text{дел.}$ ,

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

СИНХРОНИЗАЦИЯ: Y2,  $\sim$ .

Соедините кабелем гнезда генератора развертки  $\surd$  и  $\oplus$  осциллографа С1-65 со входом усилителя  $Y_2$  осциллографа С1-82. Добейтесь устойчивого изображения напряжения вращением ручки *СИНХРОНИЗАЦИЯ: УРОВЕНЬ* осциллографа С1-82. Проведите измерения длительности прямого хода  $t_{пр} = a_1 K_p$ , периода  $T_p = a_2 K_p$  и амплитуды напряжения развертки  $U_m = b K_0$  (здесь  $a_1$ ,  $a_2$  и  $b$  – соответственно длительность прямого хода, период и перепад напряжения развертки, выраженные в делениях, согласно рис. 3.2, коэффициент развертки осциллографа С1-82  $K_p$  – масштабный множитель оси  $X$ , выраженный в мс/дел. или мкс/дел., коэффициент отклонения осциллографа С1-82  $K_0$  – масштабный множитель оси  $Y$ , выраженный в В/дел. или мВ/дел.) для значений коэффициента развертки осциллографа С1-65, равного 0,1 мкс/дел. Результаты измерений занесите в табл. 3.1. 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.

#### ***3.4.2. 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 С1-82 соответственно. Схема соединения представлена на рис. 3.4.

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  $\mu s$ ; ДЛИТЕЛЬНОСТЬ 7  $\mu s$ ; АМПЛИТУДА 20 V*; полярность  $\square$ . Нажмите одновременно обе клавиши множителя выходного напряжения  $\times 0,03$ , что обеспечит поступление сигнала с обоих выходных разъемов 1:1 и 1:10.



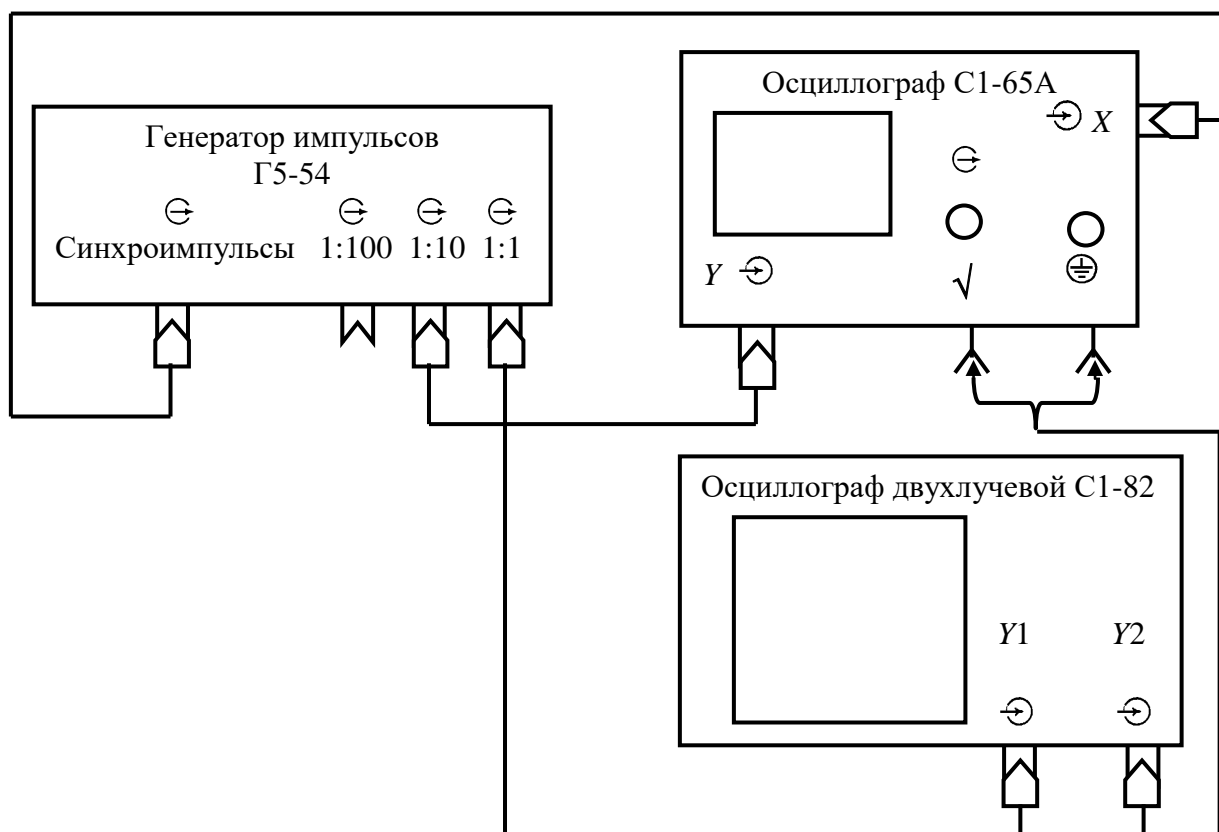


Рис. 3.4. Схема соединения приборов

Переключите развертку осциллографа С1-65 в режим *АВТ* и установите коэффициент развертки так, чтобы на экране появилось 5...6 импульсов. На экране осциллографа С1-82 одновременно наблюдайте импульсную последовательность, поданную на канал  $Y_1$ , и напряжение развертки осциллографа С1-65, поступающее на каналы  $Y_2$ . При этом установите коэффициент развертки осциллографа С1-82 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 С1-82. **Сфотографируйте осциллограммы № 1 и 2 с обоих осциллографов.** Определите по осциллограмме с осциллографа С1-82 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 **сфотографируйте осциллограммы № 3 и 4 с обоих осциллографов**, предварительно установив удобный коэффициент развертки на осциллографе С1-82. Определите по осциллограмме с осциллографа С1-82, сколько импульсов укладыва-

ется 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*. **Сфотографируйте осциллограммы № 5 и 6 и сравните их с осциллограммами 3 и 4**, полученными в режиме внутренней синхронизации. В отчете объясните, чем и почему отличаются эти осциллограммы?

Выключите осциллограф С1-82, 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  $\tau$  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  $A_{И}$  и установленных  $A_{У}$  параметров  $(A_{И} - A_{У}) / A_{У} \cdot 100\%$ . Результаты занесите в табл. 3.2.

### 3.4.3. 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  $\tau$ , а также длительности фронта  $\tau_{\phi}$  и среза  $\tau_c$ . Эти параметры регламентируются ГОСТом и определяются в соответствии с рис. 3.5.

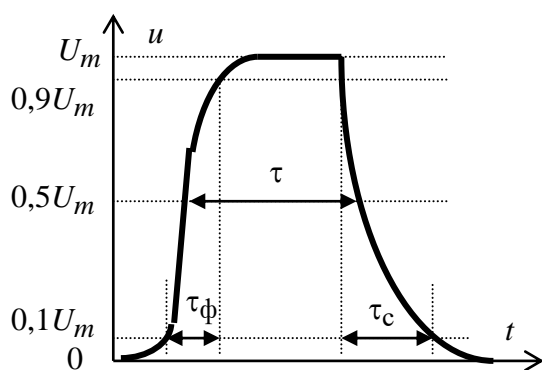


Рис. 3.5. Параметры импульса

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 будут соответствовать 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. 3.5). Результаты измерений занесите в табл. 3.3.

Установите длительность импульса генератора  $\tau = 1$  мкс и вновь проведите измерения длительности импульса, а также длительностей фронта и среза. Результаты занесите в табл. 3.3.

### 3.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему ЭЛО, таблицы по установленной форме с результатами измерений и расчетов, 6 осциллограмм и выводы по 3.4.2.

### 3.6. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 3.1

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

Таблица 3.2

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

Таблица 3.3

$\tau_y$	$\tau$			$\tau_\phi$			$\tau_c$		
	$a$ , дел.	$K_p$	$\tau = a K_p$	$a$ , дел.	$K_p$	$\tau_\phi = a K_p$	$a$ , дел.	$K_p$	$\tau_c = a K_p$

### 3.7. 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 нужна регулировка *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 *У* 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 достоинства двухлучевого осциллографа в сравнении с однолучевым?
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 подаче на вход *У* периодического импульсного сигнала?
15. Объясните, почему может «бежать» изображение периодического сигнала на экране осциллографа при использовании автоколебательного режима генератора развертки. Сформулируйте условие неподвижности изображения.

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

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

### 4.1. Общие сведения

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

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

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

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

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

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

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

где  $\varphi$  – 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  $\varphi = 2\pi f t_3$ .

### 4.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа

Фазовый сдвиг можно измерить непосредственно *по осциллограммам исследуемых напряжений*, наблюдая их одновременно на экране осциллографа (рис. 4.1). 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 осцилло-

граф с двухлучевой электронной трубкой или со встроенным электронным коммутатором. Погрешность измерения угла  $\varphi$  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  $\varphi$ ;  $\Delta a, \Delta b$  – 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. 4.2). Фазовый сдвиг определяют по формуле

$$\varphi = \arcsin(h/H) = \arcsin(l/L), \quad (4.1)$$

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

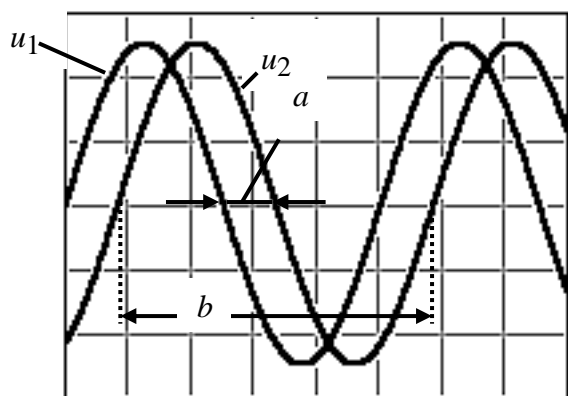


Рис. 4.1. Измерение фазового сдвига с помощью двухлучевого осциллографа

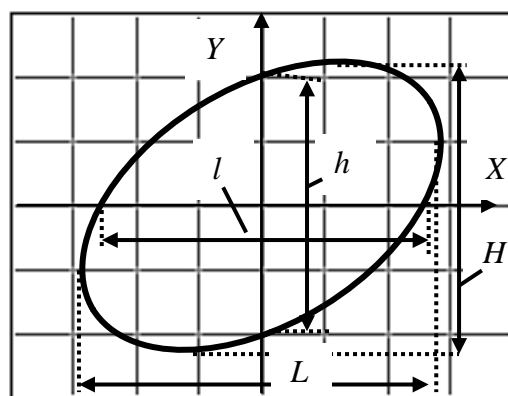


Рис. 4.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа в  $XY$ -режиме

Погрешность измерения этим способом вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2} \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.2)$$

а погрешность  $\Delta h$  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,  $\varphi = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_{yx}$ , где  $\varphi_{yx}$  – сдвиг фаз между каналами  $Y$  и  $X$ .

Измерение фазового сдвига нулевым (компенсационным) способом поясняет рис. 4.3. С помощью предварительно отградуированного фазовращателя ( $\varphi_{\phi} = \text{var}$ ) к фазе напряжения  $u_2$  добавляют фазовый угол  $\varphi_{\phi}$ , такой, чтобы

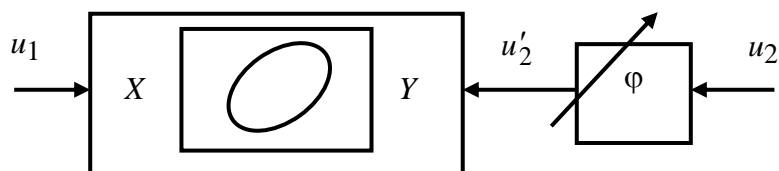


Рис. 4.3. Компенсационный способ измерения фазового сдвига

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:  $\varphi = \varphi_{\phi}$ . В качестве нуль-индикатора в данной работе используется осциллограф в  $XU$  – режиме. Равенству фаз напряжений  $u_1$  и  $u'_2$  соответствует момент стягивания эллипса в прямую линию. Погрешность измерения угла  $\varphi$  этим способом складывается из погрешности градуировки фазовращателя, систематической погрешности  $\varphi_{yx}$ , погрешности определения момента равенства фаз. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки фазовращателя на каждой частоте, так как  $\varphi_{\phi}$  зависит от частоты.

### 4.3. Цифровой фазометр Ф2-16

#### *Основные технические характеристики цифрового фазометра*

- 1) диапазон рабочих частот 0,002...2000, кГц;
- 2) диапазон входных напряжений 0,002...2, В;
- 3) пределы измерения разности фаз  $\pm 180^\circ$ ; 0...360°.

- 4) основная погрешность измерения разности фаз (при относительной нестабильности частоты сигнала не более  $10^{-4}$  за 10 мин)  $\Delta\varphi \leq \pm(0,2 + 0,004\varphi + 0,05 A)$ , где  $\varphi$  – измеряемая разность фаз в градусах;  $A$  – отношение входных напряжений, дБ.
- 5) входное сопротивление прибора более 1 МОм, входная емкость 30 пФ.

**Принцип действия.** В фазометре Ф2-16 измеряемый фазовый сдвиг преобразуется во временной интервал (рис. 4.4, а и б).

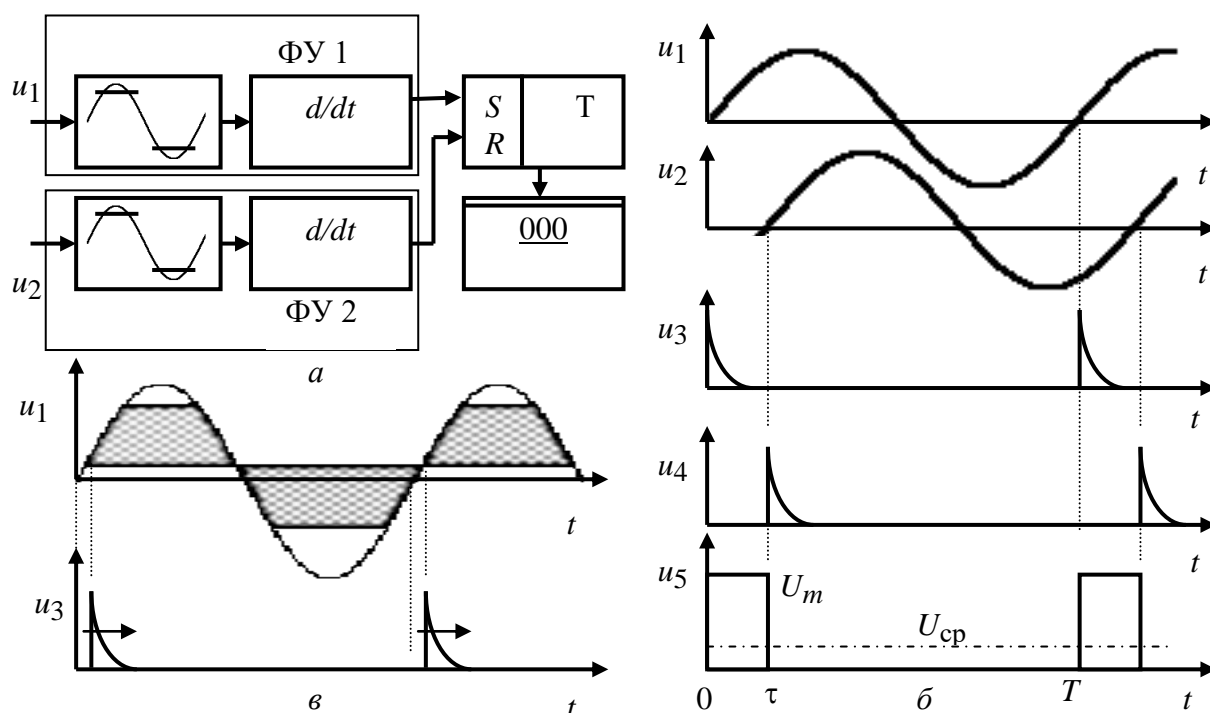


Рис. 4.4. Структурная схема и временные диаграммы фазометра с преобразованием фазового сдвига во временной интервал

С помощью формирующих устройств (ФУ) из исследуемых напряжений  $u_1$  и  $u_2$  вырабатываются кратковременные импульсы в моменты перехода напряжений через 0 в сторону увеличения. Эти импульсы поступают на входы  $S$  и  $R$  триггера  $T$ , и на его выходе формируются прямоугольные импульсы. Длительность импульсов триггера  $\tau$  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 пока-



зания вольтметра численно совпадали с фазовым сдвигом  $\varphi$ , выраженным 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. 4.4, в). Дифференцирующая цепь, входящая в ФУ, постоянную составляющую не пропускает, поэтому моменты перехода напряжения через нуль смещаются (показано на рисунке стрелками). Изменение интервала  $\tau$  приводит к погрешности измерения фазового сдвига.

**Структурная схема.** Фазометр Ф2-16 выполнен по двухканальной схеме; опорный канал (ОК) и измерительный канал (ИК) идентичны (рис. 4.5). 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. 4.6).

Роль дифференцирующих цепочек выполняют дискриминаторы уровня.

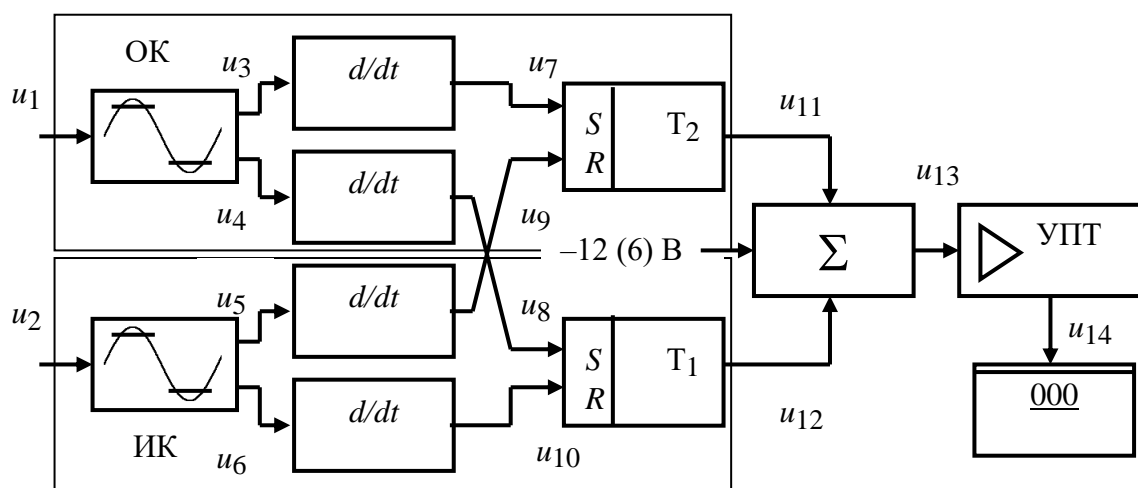


Рис. 4.5. Структурная схема фазометра Ф2-16

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  $T_2$  переключается положительным импульсом  $u_7$  и отрицательным импульсом  $u_9$ . Триггер  $T_1$  переключается соответственно импульсами  $u_8$  и  $u_{10}$ , которые

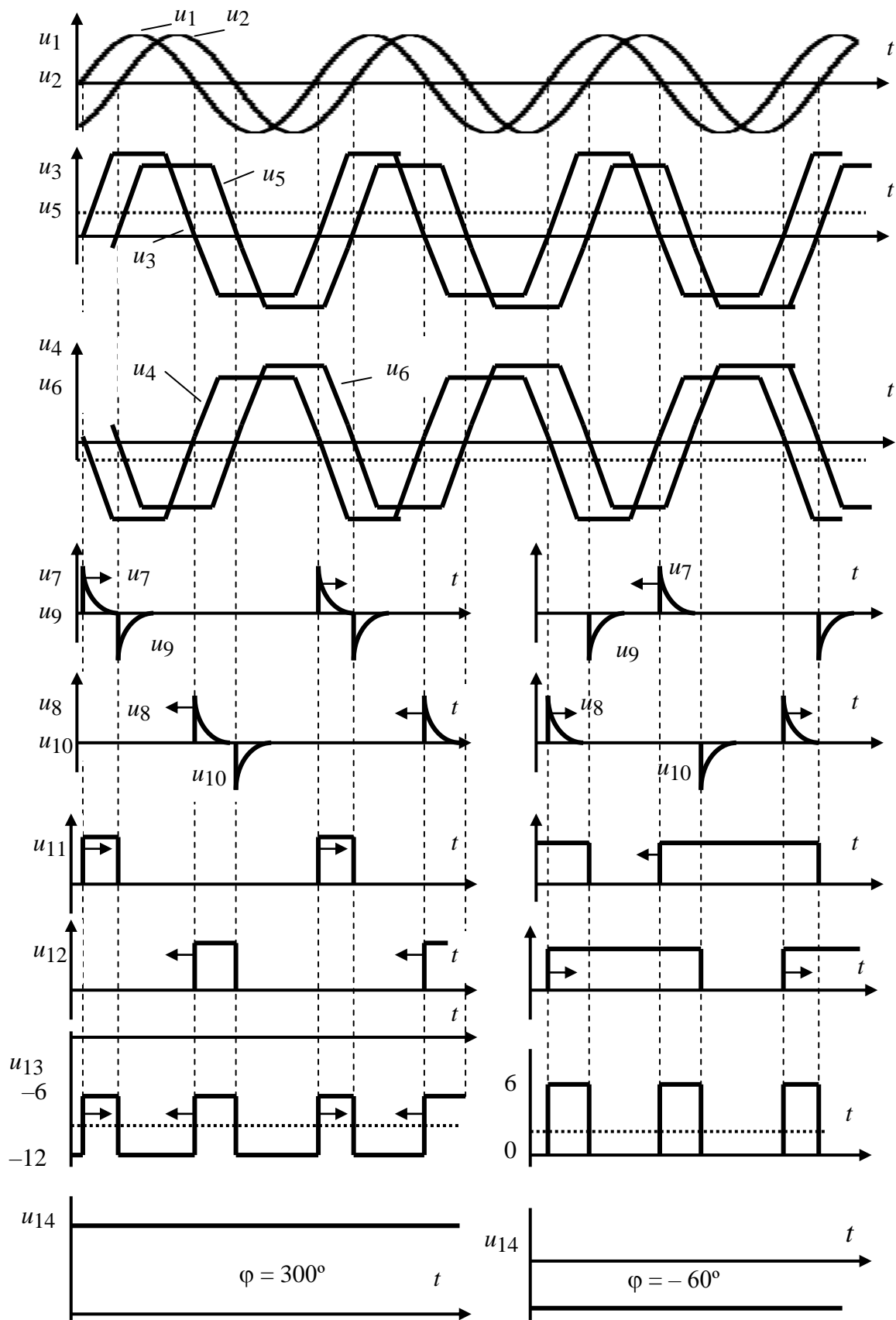


Рис. 4.6. Временные диаграммы, поясняющие работу фазометра Ф2-16

сдвинуты на полпериода относительно  $u_7$  и  $u_9$ . Прямоугольные импульсы  $u_{11}$  и  $u_{12}$  амплитудой 6 В с  $T_1$  и  $T_2$  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. 4.6. Импульс  $u_{11}$  станет короче, а импульс  $u_{12}$  – длиннее, поэтому результирующая постоянная составляющая останется без изменения.

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. 4.6 справа.

#### 4.4. 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. 4.7, а. Векторная диаграмма (рис. 4.7, б) поясняет его работу. Фазовый угол между напряжениями на конденсаторе и на резисторе равен  $90^\circ$ . Сумма этих напряжений в данной схеме при любых значениях  $R$  и  $C$

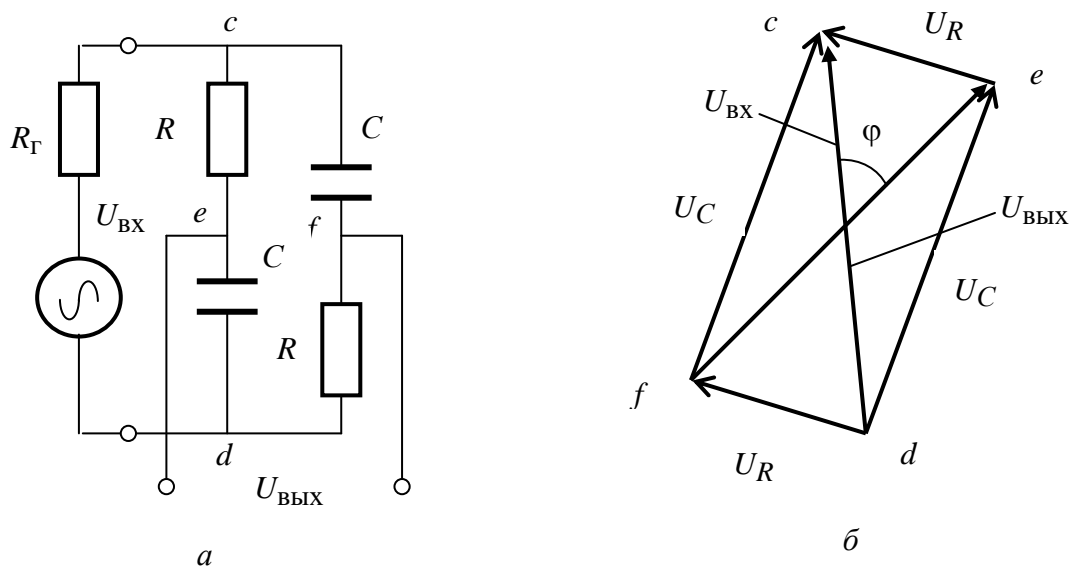


Рис. 4.7. Схема и векторная диаграмма напряжений фазовращателя

остаётся постоянной, равной входному напряжению. Выходное напряжение снимается между точками  $e$  и  $f$  фазовращателя. Из диаграммы видно, что при одновременном изменении сопротивлений резисторов  $R$  от 0 до  $\infty$  фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями меняется от 0 до  $180^\circ$ . Амплитуда выходного напряжения остаётся при этом постоянной, равной амплитуде входного. Фазовый сдвиг определяется формулой  $\varphi_\Phi = 2 \arctg(2\pi fRC)$ .

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. 4.8. 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

$$\varphi_T = -\arctg\left(\frac{1}{2\pi fRC}\right). \quad (4.3)$$

**Линии задержки.** Простейшая линия задержки представляет собой ряд каскадно включенных  $LC$ -звеньев (рис. 4.9). Каждое звено даёт временную задержку  $t_3 = \sqrt{LC}$ ; общее время задержки линии из  $n$  звеньев  $t_3 = n\sqrt{LC}$ .

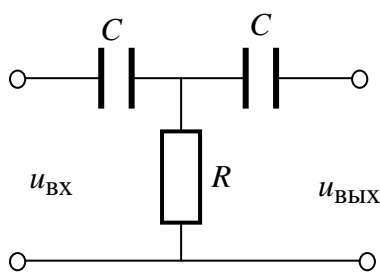


Рис. 4.8. Схема Т-моста

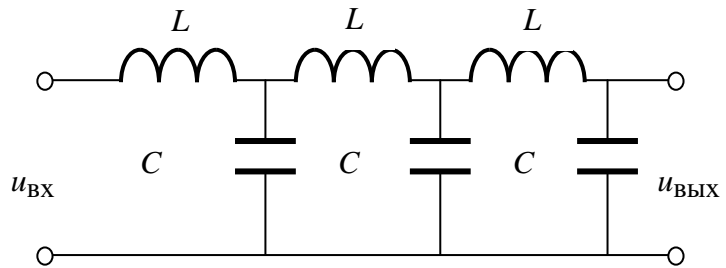


Рис. 4.9. Схема линии задержки

Волновое сопротивление такой линии  $\rho = \sqrt{L/C}$ . Для неискаженной передачи сигналов линия задержки должна быть нагружена на сопротивление  $R_H = \rho$ , а полоса ее пропускания 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  $t_3$ .

## 4.5. Задание и указания к выполнению работы

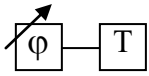
### 4.5.1. Измерение сдвига фаз между каналами Y1 и X осциллографа С1-96 способом эллипса

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 ×5 (кнопка выдвинута); нажмите кнопки УСИЛ X, АВТ. На генераторе установите следующие положения регулировок: МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ –  $10^3$ ; НАПРЯЖЕНИЕ – ФИКСИР; ОСЛАБЛЕНИЕ dB – 20; ВНУТР. НАГРУЗКА 600 Ω – в верхнем положении. Измерения проведите на указанных в табл. 4.1 частотах. При этом способе измерения нужно точно совместить центр эллипса с центром экрана осциллографа. По формулам (4.1) и (4.2) рассчитайте фазовый сдвиг  $\varphi_{YX}$  и погрешность  $\Delta\varphi_{YX}$ . Данные измерений и расчетов занесите в табл. 4.1. Постройте график зависимости  $\varphi_{YX}(f)$ .

### 4.5.2. Градуировка фазовращателя лабораторного макета с помощью фазометра Ф2-16

Определите зависимость фазового сдвига  $\varphi_\phi$  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 (для этого установите на генераторе ОСЛАБЛЕНИЕ dB – 20) 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  $\phi$ . На фазометре нажмите кнопки  $\pm$ ;  $\pm 180^\circ$ ; [ f ] kHz 20–200. На осциллографе нажмите кнопку СИНХРОНИЗАЦИЯ – Y1. Проведите измерения фазового сдвига для всех делений шкалы потенциометра. Результаты занесите в табл. 4.2. Постройте на одном графике градуировочные кривые фазовращателя  $\varphi_\phi(\alpha)$  для указанных частот.

### 4.5.3. Измерение фазового сдвига T-моста нулевым способом

Переключатель рода работ макета установите в положение . Соедините разъемы макета Вых1 и Вых2 с входом осциллографа СИНХР 1:1 и УСИЛИТЕЛЬ Y1. На осциллографе нажмите кнопки УСИЛИТЕЛЬ X,

*РАСТЯЖКА*  $\times 5$  (кнопка выдвинута). Регулировкой фазовращателя добейтесь стягивания изображения эллипса в прямую линию. При этом  $\varphi_T = \varphi_\phi$ . Запишите значения  $\alpha$ , дел., в табл. 4.3. Пользуясь градуировочными кривыми фазовращателя, определите фазовый сдвиг Т-моста на указанных в табл. 4.3 частотах, запишите значения  $\varphi_T$  изм.. Рассчитайте фазочастотную характеристику Т-моста по формуле (4.3). Учтите, что  $C = 400$  пФ,  $R = 3.3$  кОм. Результаты измерений и расчета занесите в табл. 4.3. Постройте экспериментальную и расчетную ФЧХ Т-моста и сравните их.

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

Фазометр используется в режиме  $0 \dots 360^\circ$ . Измерения проведите в диапазоне частот от 20 до 200 кГц. Переключатель рода работ макета установите в положение ЛЗ. На фазометре Ф2-16 нажмите кнопки  $0 - 360^\circ$ ;  $[f]$  kHz 20–200. Результаты измерений занесите в табл. 4.4 и постройте графики зависимостей  $\varphi_{\text{Л}}(f)$ . По данным табл. 4.4 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  $\Delta f$ . Сравните найденные значения  $t_3$  с указанными на макете.

#### 4.6. Содержание отчета

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

#### 4.7. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 4.1

Измеряемая величина	$f$ , кГц						
	5	10	15	20	50	100	200
$l$ , дел.							
$L$ , дел.							
$\varphi_{УХ}$							
$\Delta\varphi_{УХ}$							

Таблица 4.2

$\alpha$ , дел.	$f$ , кГц					
	12	15	18	20	25	30
1						
2						
:						
11						

Таблица 4.3

Фазовый сдвиг	$f$ , кГц					
	12	15	18	20	25	30
$\alpha$ , дел.						
$\Phi$ Т изм						
$\Phi$ Т расч						

Таблица 4.4

$\Phi$ Л	$f$ , кГц									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\Phi$ Л1										
$\Phi$ Л2										
$\Phi$ Л3										

#### 4.8. 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. 4.6.
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?

## 5. 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.

### 5.1. 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  $X$  составляющие (рис. 5.1). Если реактивное сопротивление носит индуктивный характер, то  $X = \omega L = 2\pi fL$ , а если емкостной, то  $X = -1/(\omega C) = -1/(2\pi fC)$ ,  $\omega$  – круговая частота, а  $f$  – частота, на которой проводят измерения. При индуктивном характере сопротивления в последовательной эквивалентной схеме (рис. 5.1)  $Q = \omega L/R = 1/D$ , в случае емкостного характера сопротивления  $D = \omega CR = 1/Q$ .

Полная проводимость  $Y = G + jB$  в общем случае состоит из активной  $G$  и реактивной  $B$  составляющих (рис. 5.2). Для проводимости емкостного характера  $B = \omega C = 2\pi fC$ , а при индуктивном характере  $B = -1/\omega L = -1/2\pi fL$ . В параллельной схеме (рис. 4.2)  $D = 1/\omega CR = G/\omega C = 1/Q$ .



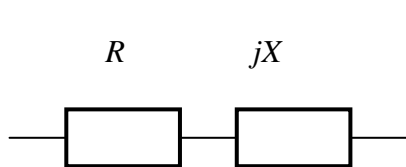


Рис. 5.1. Полное сопротивление

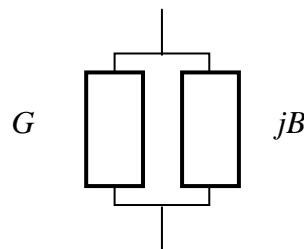


Рис. 5.2. Полная проводимость

Измеритель иммитанса E7-15 предназначен для измерения иммитансных параметров электрорадиокомпонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности.

Структурная схема прибора приведена на рис. 5.3. 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  $Z$ .

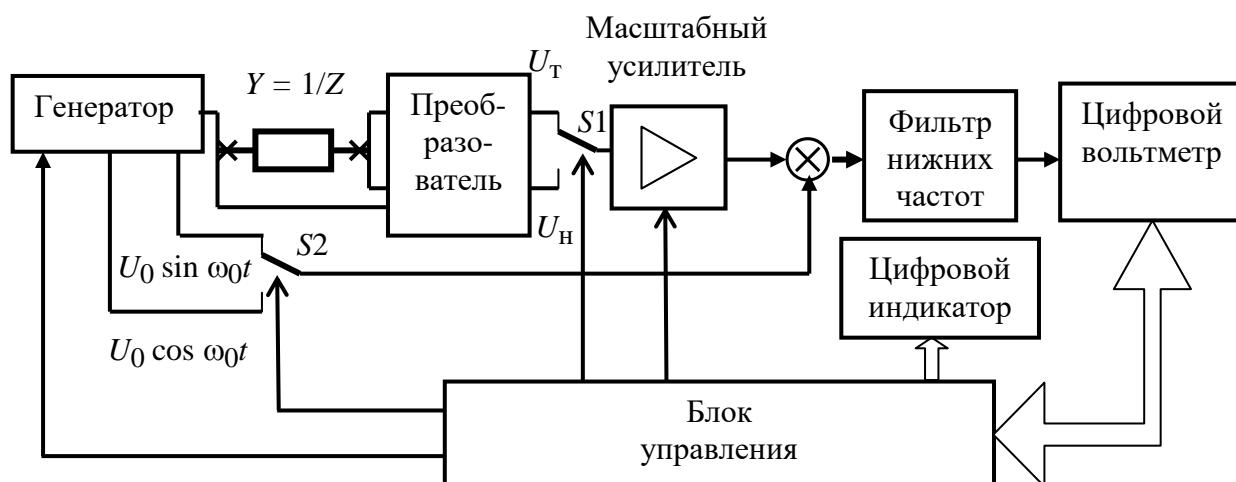


Рис. 5.3. Структурная схема измерителя иммитанса E7-15

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. 5.4 изображены комплексные амплитуды  $\dot{U}_T$  и  $\dot{U}_H$  и опорные вспомогательные напряжения  $U_{0П}$  и  $jU_{0П}$ .

Проекции комплексных амплитуд  $\dot{U}_T$  и  $\dot{U}_H$  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

$$Y = G + jB = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = k_Y \frac{\dot{U}_T}{\dot{U}_H} = k_Y \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_0} = k_Y \frac{E + jF}{S + jT}, \quad (5.1)$$

где  $G$  – активная проводимость;  $B$  – реактивная проводимость;  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$  – комплексные амплитуды тока и напряжения на исследуемом элементе;  $k_Y$  – известный коэффициент, имеющий размерность проводимости;  $\dot{U}_x$  – числитель измеряемого отношения;  $\dot{U}_0$  – знаменатель измеряемого отношения;  $E$ ,  $F$ ,  $S$ ,  $T$  – проекции векторов  $\dot{U}_T$  и  $\dot{U}_H$  на оси опорных напряжений  $U_{оп}$  и  $jU_{оп}$ . Из (5.1) следует

$$G = k_Y \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, \quad B = k_Y \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.2)$$

Аналогичные соотношения имеют место для вычисления полного сопротивления

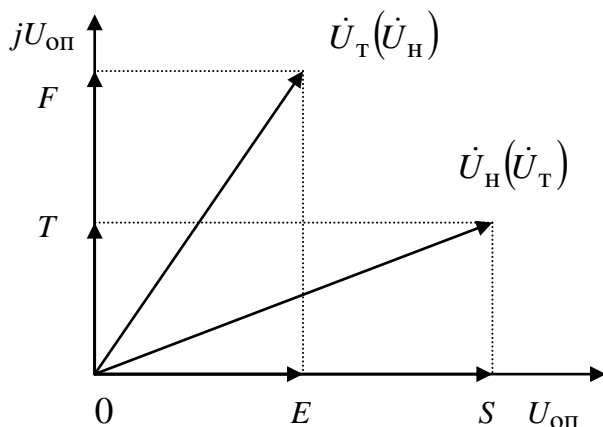


Рис. 5.4. Векторная диаграмма напряжений

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

где  $R$  – активное сопротивление,  $X$  – реактивное сопротивление, вычисляемые по формулам,  $k_Z$  – известный коэффициент, имеющий размерность сопротивления

$$R = k_Z \frac{ES + FT}{S^2 + T^2}, \quad X = k_Z \frac{FS - ET}{S^2 + T^2}. \quad (5.3)$$

Таким образом, для определения полной проводимости или полного сопротивления необходимо измерить проекции векторов  $E$ ,  $S$ ,  $F$  и  $T$ .

При измерении высокоомных объектов (1–4 пределы измерения), когда генератор сигнала является источником напряжения, предпочтительнее осу-

осуществлять измерения в виде составляющих полной проводимости ( $\dot{U}_x = \dot{U}_T, \dot{U}_0 = \dot{U}_H$ ).

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 ( $\dot{U}_x = \dot{U}_H, \dot{U}_0 = \dot{U}_T$ ). 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  $\dot{U}_x$  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

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

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

Переменные 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. 5.4). Измеренные значения вводятся в блок управления, после чего производится вычисления по формулам (5.2) или (5.3).

## 5.2. Краткое описание характеристик измерителя иммитанса E7-15

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. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Предел измерения	Емкость $C$ на частотах, кГц		Проводимость $G$
	0,1	1	
1	1...1600 пФ	0,1...160,0 пФ	1...50 нСм
2	0,01...16,00 нФ	1...1600 пФ	0,01...1,00 мкСм
3	0,1...160,0 нФ	0,01...16,00 нФ	0,1...10,0 мкСм
4	1...1600 нФ	0,1...160,0 нФ	1...100 мкСм
5	1,600...16,00 мкФ	160,0...1600 нФ	—
6	16,00...160,0 мкФ	1,600...16,00 мкФ	—
7	160,0...1600 мкФ	1,600...16,00 мкФ	—
8	1,600...20,00 мФ	160,0...1600 мкФ	—

Таблица 5.2

Предел измерения	Индуктивность $L$ на частотах, кГц		Сопротивление, $R$
	0,1	1	
1	1,600...1600 кГн	160,0...1600 Гн	1,000...20,00 МОм
2	160,0...1600 Гн	16,00...160,0 Гн	100,0...1000 кОм
3	16,00...160,0 Гн	1,600...16,00 Гн	10,00...100,0 кОм
4	1,600...16,00 Гн	160,0...1600 мГн	1,000...10,00 кОм
5	1...1600 мГн	0,1...160,0 мГн	1...1000 Ом
6	0,1...160,0 мГн	0,01...16,00 мГн	0,1...100,0 Ом
7	0,01...16,00 мГн	1...1600 мкГн	0,01...10,00 Ом
8	1...1600 мГн	0,1...160,0 мкГн	1...1000 МОм

Пределы допускаемого значения основной погрешности измерения иммитансных параметров на частотах 0,1 и 1 кГц должны быть равны значениям, указанным в табл. 5.3...5.10.  $C'$ ,  $L'$ ,  $R'$ ,  $G'$  – максимальные значения измеряемых на каждом из пределов величин (табл. 5.1 и 5.2).

Таблица 5.3

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 5.4

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 5.5

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 5.6

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 5.7

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 5.8

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 5.9

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	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2)+0,63 \cdot 10^{-3}\frac{C'}{C}Q(1+Q)$

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$Q$ (для емкостей)	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 5.10

Параметр	Предел измерения	Погрешность измерения
$Q$ (для индуктивностей)	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	$2,5 \cdot 10^{-3}(1+Q^2) + 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{L'}{L} Q(1+Q)$

### 5.3. 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  $R_x$ ; 30 конденсаторов, подключаемых теми же переключателями к гнездам  $C_x$ ; 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*.

### 5.4. 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 RG*, *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 *ПА-*

*ПАРАМЕТР* пользователь может установить прибор в режим измерения реактивной ( $L$  или  $C$ ) либо активной ( $R$  или  $G$ ) составляющей иммитанса или в режим измерения относительного параметра ( $D$  или  $Q$ ).

Клавишей *ЧАСТ* установить требуемую частоту  $100\text{ Hz}$  или  $1\text{ kHz}$ .

При измерении емкости электролитических конденсаторов нажатием кнопки *СМЕЩЕНИЕ* можно подать поляризующее напряжение  $+4,8\text{ В}$  (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, А). 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  $1,5\text{ с}$ ). 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*.

#### **5.4.1. Измерение сопротивлений резисторов прибором E7-15**

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

**Измерение сопротивлений резисторов.** Изменяя положения переключателей  $S2$  (положения 1...3) и  $S3$  (положения 1...10), 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  $\sigma^2$ :

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

где  $m$  – объем выборки;  $R_i$  – измеренное значение;  $R_{\text{НОМ}} = 12$  кОм. При этом выполните расчеты для  $m = 10$  (первые десять измерений),  $m = 20$  (первые двадцать измерений) и  $m = 30$ .

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  $\gamma$ . Для определения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  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 для трех значений  $m$ , пользуясь коэффициентом Стьюдента  $t(\gamma, m)$ , представляющим собой табулированное значение интеграла Стьюдента, %:

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

Задайте  $\gamma = 0,95$ . Тогда при  $m = 10$  значение  $t(0,95; 10) = 2,228$ ; для  $m = 20$  значение  $t(0,95; 20) = 2,086$ ; для  $m = 30$  значение  $t(0,95; 30) = 2,042$ . Результаты измерений и расчетов оформите в виде табл. 5.11.

#### **5.4.2. Измерение емкостей конденсаторов прибором E7-15**

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  $S2$  (положения 1...3) и  $S1$  (положения 1...10), поочередно измерьте емкости 30 конденсаторов. Произведите статистическую обработку результатов измерений по методике 5.4.1 для трех значений объема измерений:  $m = 10$  (первые десять измерений),  $m = 20$  (первые двадцать измерений) и  $m = 30$ . Значения  $C_{\text{НОМ}} = 1200$  пФ. Результаты измерений расчетов оформите в виде табл. 5.12.

#### **5.4.3. 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 E7-15). Спи-



шите 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 *A*. 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.

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

Повторите измерения емкости и фактора потерь конденсатора на частоте 100 Гц, для чего воспользуйтесь клавишей *ЧАСТ*. Не забывайте 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 5.2. По измеренным значениям емкости и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления или проводимости потерь конденсатора для двух частот. Для этого воспользуйтесь материалами из 5.1.

Сегнетоэлектрический конденсатор является нелинейным элементом, его емкость зависит от приложенного к нему постоянного напряжения. Это объясняется изменением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической керамики при ее поляризации. Повторите проведенные измерения при напряжении смещения, приложенном к конденсатору, равном 4,8 В. Для этого нажмите кнопку *ВКЛ СМЕЩЕНИЕ*. При измерении емкости конденсатора с подачей напряжения смещения следует учитывать, что постоянная заряда измеряемого конденсатора составляет десятки секунд и требуется время для установления показаний прибора.

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. 5.13.

#### **5.4.4. 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).

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

Повторите измерения индуктивности и фактора потерь катушки на частоте 100 Гц при отключенном и включенном смещении, для чего воспользуйтесь клавишей *ЧАСТ*. Не забывайте 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 5.2. По измеренным значениям индуктивности и фактора потерь рассчитайте также значение сопротивления потерь катушки, ее добротность. Воспользуйтесь для этого материалами из 5.1. Определите также погрешность определения добротности для двух частот по формуле  $\Delta Q = \Delta D / D^2$ .

Результаты сведите в табл. 5.14.

#### **5.5. 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 по установленной форме; краткие выводы и анализ полученных результатов.

## 5.6. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 5.11

		<i>i</i>			
		1	2	...	30
$R_i$ , кОм				...	
$m = 10$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %
$m = 20$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %
$m = 30$	$\bar{R} =$	$\overline{\Delta R} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %

Таблица 5.12

		<i>i</i>			
		1	2	...	30
$C_i$ , пФ				...	
$m = 10$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %
$m = 20$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %
$m = 30$	$\bar{C} =$	$\overline{\Delta C} =$	$\sigma^2 =$	$\delta_1 =$ %	$\delta_2 =$ %

Таблица 5.13

Частота	$C$	Посл./ парал.	Предел	$D$	$C'$	$\Delta C$	$\Delta D$	$R/G$
1 кГц Смещ. выкл.								
1 кГц Смещ. вкл.								
100 Гц Смещ. выкл.								
100 Гц Смещ. вкл.								

Таблица 5.14

Частота	$L$	Посл./ парал.	Предел	$D$	$L'$	$\Delta L$	$\Delta D$	$R$	$Q$	$\Delta Q$
1 кГц										
100 Гц										

Примечание: не забывайте указывать во всех таблицах наряду с числовыми значениями единицы измерения физических величин.

## 5.7. Контрольные вопросы

1. Перечислите иммитансные параметры компонентов цепей и приведите соответствующие эквивалентные схемы.

2. Поясните назначение элементов структурной схемы измерителя иммитанса E7-15.
3. Поясните принцип работы измерителя иммитанса E7-15.
4. Какими параметрами оценивают разброс значений при измерении большой партии однотипных элементов? Поясните смысл и методику 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, пропорциональных току, протекающему через исследуемый элемент, и напряжению на нем?
8. Какую роль выполняет фильтр нижних частот, какой вид имеет напряжение на его входе и выходе?
9. В чем состоит разница при измерении параметров высокоомных и низкоомных объектов?
10. Какие функции выполняет блок управления?
11. Выведите формулу для определения погрешности косвенного измерения добротности катушки  $\Delta Q$  по измеренному фактору потерь  $D$  и рассчитанной погрешности его измерения  $\Delta D$ .
12. Как зависят границы доверительного интервала от количества измерений и доверительной вероятности?
13. Изобразите эквивалентную схему сегнетоэлектрического конденсатора и объясните, почему его емкость зависит от приложенного к нему постоянного напряжения смещения.

## **6. ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

В лабораторной работе изучаются устройство генераторов сигналов и принципы их применения в радиоизмерительной практике. 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), GFG-8219А (функцио-

нальный генератор сигналов сложной формы). При поверке используют образцовые приборы: частотомер Agilent 53181A, цифровой осциллограф GOS-820, цифровой мультиметр GDM-8246. Для согласования сопротивлений генератора и измерительных приборов применяется выносная нагрузка со стандартным активным сопротивлением.

### 6.1. 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).

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

Согласно ГОСТ 15069–86 измерительные генераторы делят по функциональному назначению на подгруппы:

1. Низкочастотные генераторы сигналов (подгруппа Г3) – источники гармонических (синусоидальных) колебаний низких частот (от десятков герц до сотен килогерц –...единиц мегагерц);
2. Высокочастотные генераторы сигналов (Г4) – приборы, вырабатывающие гармонические модулированные и немодулированные колебания высоких и сверхвысоких частот (от 0,1 МГц до десятков гигагерц);
3. Генераторы импульсов (Г5) – источники одиночных или периодических видеоимпульсов, обычно прямоугольной формы.
4. Генераторы сигналов специальной формы (Г6). Это функциональные генераторы низких и инфранизких частот, генераторы колоколообразных импульсов, сигналов случайной формы с нормируемыми статистическими параметрами (шумовые генераторы).
5. Генераторы сигналов произвольной формы с прямым цифровым синтезом сигнала (Direct Digital Synthesis – DDS)
6. Синтезаторы частоты на основе деления и умножения частоты опорного высокостабильного генератора.

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

Основным блоком измерительного генератора гармонических колебаний, определяющим частоту и форму выходного сигнала, является *задающий генератор*.

Задающие генераторы (автогенераторы) гармонических колебаний содержат активный четырехполюсник (усилитель) с коэффициентом передачи  $K_y(j\omega)$  и пассивный четырехполюсник положительной обратной связи (ПОС) с коэффициентом передачи  $K_{oc}(j\omega)$  (рис. 6.1).

При их последовательном соединении коэффициент передачи разомкнутой системы равен  $K_p(j\omega) = K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega)$ .

В разомкнутой системе

$$K_y(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}, \text{ а } K_{oc}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}},$$

где  $\dot{U}_{\text{ВХ}}$ ,  $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}$  и  $\dot{U}_{oc}$  – комплексные амплитуды в различных точках схемы (рис. 6.1, а). При замыкании цепи обратной связи на вход активного четырехполюсника  $\dot{U}_{oc} = \dot{U}_{\text{ВХ}}$ , тогда  $K_y(j\omega) = 1/K_{oc}(j\omega)$ . Таким образом, в установившемся режиме на частоте генерации  $\omega_r$  в автогенераторе должно выполняться условие

$$K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega) = 1. \quad (6.1)$$

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:

$$K_y(j\omega)K_{oc}(j\omega) = 1,$$

$$\varphi_y(\omega_r) + \varphi_{oc}(\omega_r) = 2\pi.$$

Для генераторов гармонических колебаний используют резонансные цепи обратной связи (резонансный контур). Амплитудно- и фазочастотные характеристики контура показаны на рис. 6.2. Баланс фаз выполняется на резонансной частоте контура, когда частота генерации практически совпадает с

частотой резонанса. Подбором коэффициента передачи усилителя компенсируют потери сигнала в цепи обратной связи (баланс амплитуд).

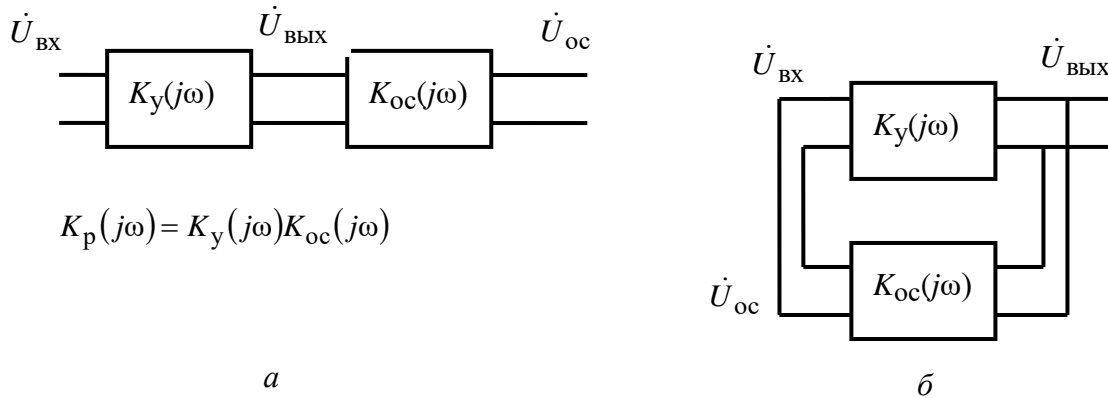


Рис. 6.1. Структура из двух четырехполюсников: *a* – в разомкнутом виде; *б* – с замкнутой цепью обратной связи

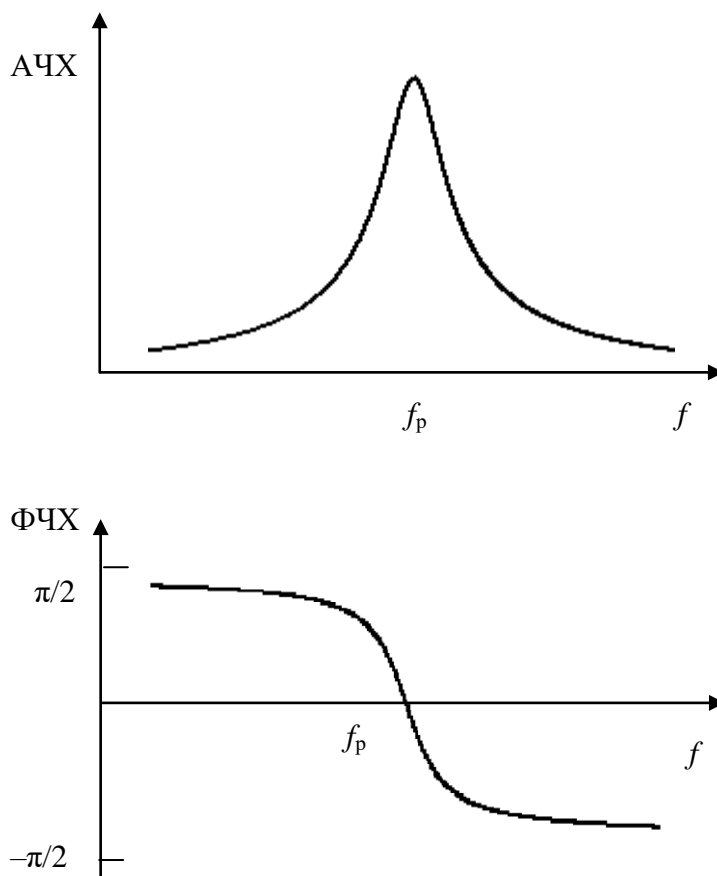


Рис. 6.2. АЧХ и ФЧХ частото задающего контура ПОС

Если в усилителе возникает нестабильный фазовый сдвиг (например, из-за влияния на активный элемент температуры, ухода питающего напряжения и пр.), то он компенсируется фазовым сдвигом в цепи ОС. При линейной ФЧХ вблизи резонанса это означает смещение частоты генерации. Чем меньше наклон ФЧХ, тем больше это смещение. Поэтому для повышения стабильности частоты требуются контура с крутой ФЧХ, а, следовательно, с высокой добротностью.

В задающих генераторах ВЧ в цепи ПОС используют высокодобротные *LC*-контуры с переключаемыми катушками индуктивности и плавной перестройкой переменным конденсатором. Для получения высокой стабильности частоты применяют катушки индуктивности на керамических сердечниках, температурную стабилизацию контура, воздушные конденсаторы переменной емкости с малыми потерями.

Однако на низких частотах параметры *L* и *C* элементов становятся неприемлемо большими (частота генерации примерно обратно пропорциональна индуктивности и емкости  $\omega_T \approx \omega_p = 1/\sqrt{LC}$ ). Увеличивается активное сопротивление потерь катушки, влияние температуры на ее индуктивность, растут габариты контура. Это не позволяет получить высокую добротность *LC*-контура и, следовательно, необходимую стабильность частоты генератора. Поэтому на низких частотах в цепях ПОС используют фазосдвигающие *RC*-цепи различного вида. Переключение диапазонов осуществляют изменением сопротивлений резисторов, плавную перестройку – переменным конденсатором. Тем не менее, наклон ФЧХ такой цепи невелик и стабильность частоты *RC*-задающих генераторов обычно существенно хуже, чем у *LC*-генераторов ВЧ-диапазона. В настоящее время для генерации сигналов низкой частоты применяют цифровые генераторы с прямым синтезом формы сигнала.

В образцовых генераторах (в эталонах и мерах частоты) в качестве частото задающего контура используют пьезоэлектрический резонатор в виде пластины кварца с металлизированными поверхностями. Благодаря обратному пьезоэффекту кварцевая пластина колеблется при приложении к ней переменного напряжения. Если его частота приближается к частоте механического резонанса пластины, амплитуда механических колебаний резко усиливается. Резонатор ведет себя как колебательный *LC*-контур с большой добротностью (до сотен тысяч и даже миллионов). Это позволяет получить высокую стабильность частоты кварцевых генераторов. Однако такие генераторы не могут перестраиваться по частоте в широком диапазоне, что ограничивает область их применения источниками фиксированных (опорных) частот.



Типовая структурная схема аналогового ВЧ-генератора гармонических сигналов представлена на рис. 6.3.

Задающий генератор с  $LC$ -контуром определяет форму и частоту выходного сигнала. Усилитель предназначен для увеличения амплитуды сигнала до опорного уровня, по которому калибруют выходной аттенюатор. Усили-

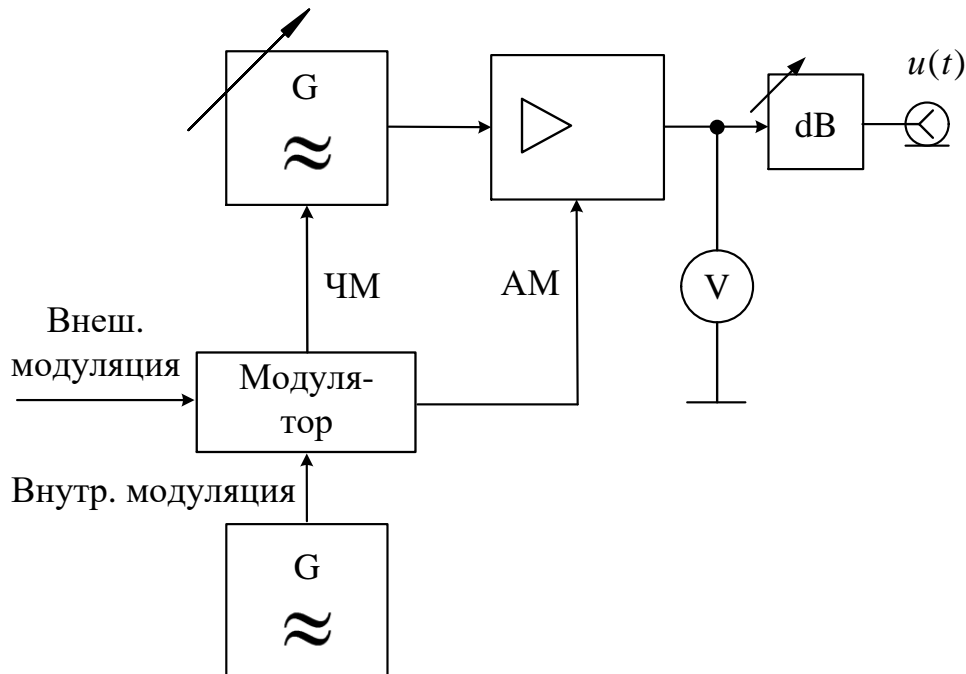


Рис. 6.3. Обобщенная структурная схема генератора ВЧ

тель обеспечивает заданную значение выходного сопротивления генератора и служит буферным блоком, исключая влияние внешней нагрузки на задающий генератор. Генераторы ВЧ обычно имеют одно постоянное значение выходного сопротивления (50 или 75 Ом).

В усилителе предусматривают плавную регулировку опорного уровня, который контролируют с помощью электронного вольтметра. В некоторых генераторах используют автоматическую систему стабилизации опорного уровня, при этом вольтметр не используется. Выходное напряжение устанавливают калиброванным аттенюатором (прецизионным пассивным делителем напряжения). Он позволяет уменьшить амплитуду выходного сигнала до необходимого (иногда довольно малого – доли микровольта) значения.

Для получения амплитудной модуляции в ВЧ-генераторах используют управление коэффициентом передачи усилителя модулирующим напряжением. Его вырабатывают в блоке модулятора, который служит усилителем внешнего сигнала модуляции или сигнала от внутреннего НЧ-генератора синусоидальной формы (обычно 400 или 1000 Гц). Электронный вольтметр ис-

пользуется для контроля параметров модуляции. В ряде генераторов предусмотрен режим частотной модуляции. В этом случае сигнал модуляции подают на задающий генератор. В его контуре устанавливают варикап – диод с электрически управляемой емкостью  $p$ - $n$ -перехода. Он позволяет управлять частотой генерации напряжением модулирующего сигнала.

Генераторы НЧ строятся по такой же схеме, однако в них не требуется вводить модуляцию сигнала. В задающем генераторе используют  $RC$ -цепи (мост Вина или фазосдвигающие  $RC$ -цепочки). На выходе НЧ-генератора иногда предусматривают согласующий трансформатор для получения нескольких стандартных значений выходного сопротивления (например, 5, 50, 600 Ом). С помощью трансформатора реализуют симметричный относительно общего провода выход, что позволяет исследовать устройства с дифференциальным входом. Атенюатор вместе с согласующим трансформатором образуют выходное устройство генератора НЧ.

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.

К метрологическим параметрами относятся 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 заданному выходному сопротивлению генератора  $R_{\text{ВЫХ}}$ . При работе с несогласованной нагрузкой ( $R_{\text{Н}} \neq R_{\text{ВЫХ}}$ ) появляется систематическая относительная погрешность установки выходного напряжения:

$$\delta U = \frac{R_{\text{Н}} - R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{ВЫХ}}}.$$

Из формулы следует, что при подключении к генератору высокоомной нагрузки (вольтметра, осциллографа) выходное напряжение будет в два раза выше ожидаемого значения.

Неидеальность формы синусоидального сигнала на выходе измерительного генератора проявляется в наличии высших гармонических составляющих. Допустимый их уровень нормируется коэффициентом гармоник 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. 6.4.

Частота повторения импульсов генератора определяется внутренним задающим генератором периодической последовательности импульсов. Чаще всего это релаксационных генератор (мультивибратор), вырабатывающий кратковременные импульсы, частота повторения которых калибрована и устанавливается с помощью дискретного и плавного регуляторов. Устройство управления позволяет выбрать режим запуска генератора: периодический – от внутреннего генератора, внешний – от сигналов произвольной формы, подаваемой на вход прибора.

Предусмотрен также разовый запуск при нажатии кнопки. В устройстве управления предусмотрен вывод синхроимпульсов, совпадающих по времени с импульсами задающего генератора. Их используют для синхронизации и запуска внешних устройств (осциллографа, частотомера и пр.). С устройства управления импульсы запуска поступают на блок временной задержки. Он обеспечивает регулируемый калиброванный временной сдвиг  $\Delta t$  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.

Задержанные импульсы запуска подают на блок формирования основных импульсов (одновибратор). Он вырабатывает прямоугольный импульс с заданной длительностью. В дальнейшем импульс усиливается и поступает на блок контроля и выходной аттенюатор (dB). Обычно в импульсных генераторах контролируют точность установки амплитуды импульсов, для чего используют широкополосный импульсный вольтметр.

К *эксплуатационным* параметрам импульсного генератора относят диапазон регулирования частоты повторения, длительности и амплитуды

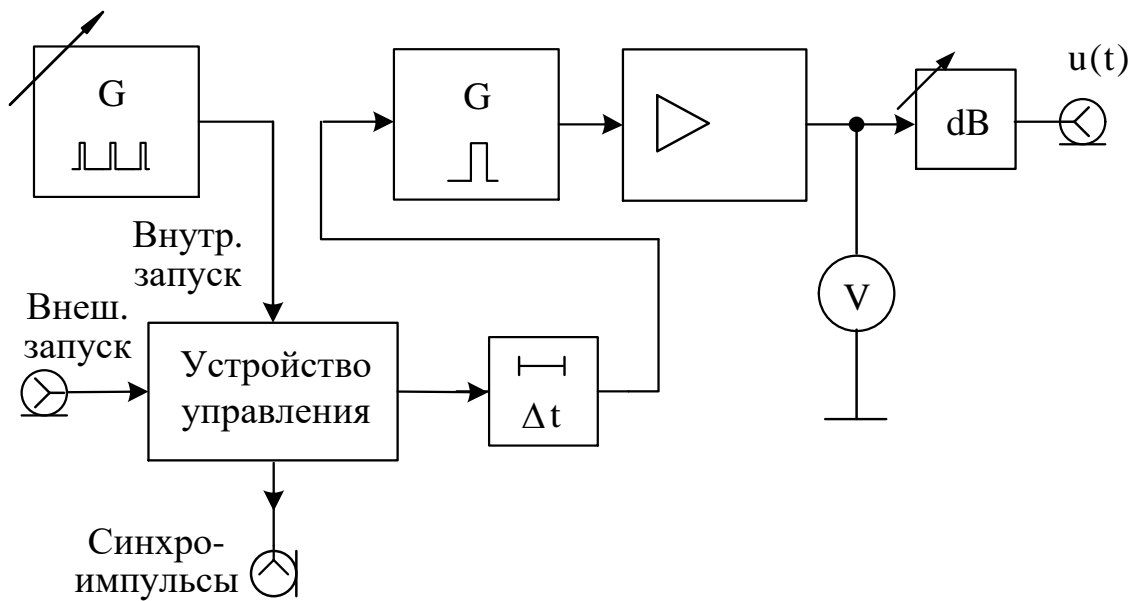


Рис. 6.4. Обобщенная структурная схема импульсного генератора

импульсов, диапазон установки времени их задержки, к *метрологическим* параметрами – пределы допускаемой погрешности установки этих параметров и точность воспроизведения формы импульса.

Осциллограмма реального выходного импульса измерительного генератора представлена на рис. 6.5.

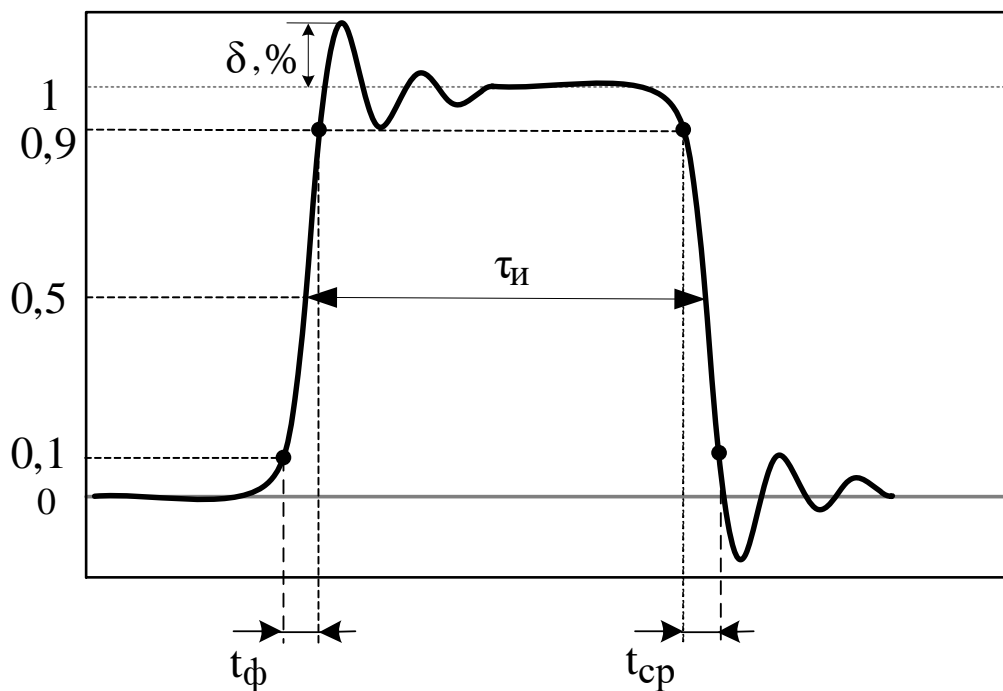


Рис. 6.5. Оциллограмма реального импульса с выбросами

Параметры импульса характеризуют степень близости его формы к идеальной прямоугольной. Амплитуду импульса  $U_m$  отсчитывают по усредненной вершине (без учета выброса  $\delta$ ), длительность импульса  $\tau$  определяют по уровню  $0,5U_m$ . Длительности фронта  $\tau_f$  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  $\tau_f, \tau_{ср} < 0,3\tau$ .

**Функциональные генераторы** – это генераторы нескольких форм сигналов (синус, меандр, треугольник и др.). Частота сигналов может меняться в широком диапазоне – от долей герц до единиц мегагерц. От рассмотренных ранее генераторов они отличаются принципом действия. Для получения напряжения разных форм используют аналоговые интеграторы на основе прецизионных операционных усилителей, охваченные ПОС. Диапазон частот ограничен частотными свойствами применяемых операционных усилителей. Особенностью таких приборов является возможность управления частотой с помощью напряжения. Это позволяет использовать функциональные генераторы в измерителях АЧХ и в генераторах с частотной модуляцией.

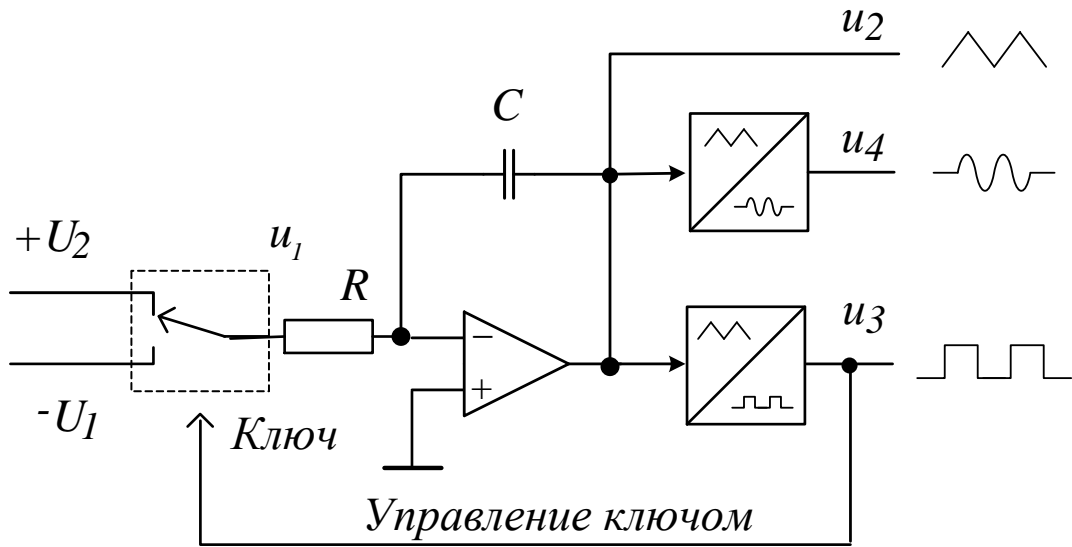


Рис. 6.6. Структурная схема задающего блока функционального генератора

На рис. 6.6 представлена упрощенная схема задающего блока функционального генератора с одним интегратором и релейным элементом в виде двухстороннего симметричного ограничителя (триггера Шмидта).

Аналоговый интегратор – функциональный преобразователь на операционном усилителе, охваченный частотнозависимой отрицательной обратной связью в виде  $RC$ -цепочки. При подаче на вход постоянного напряжения вы-

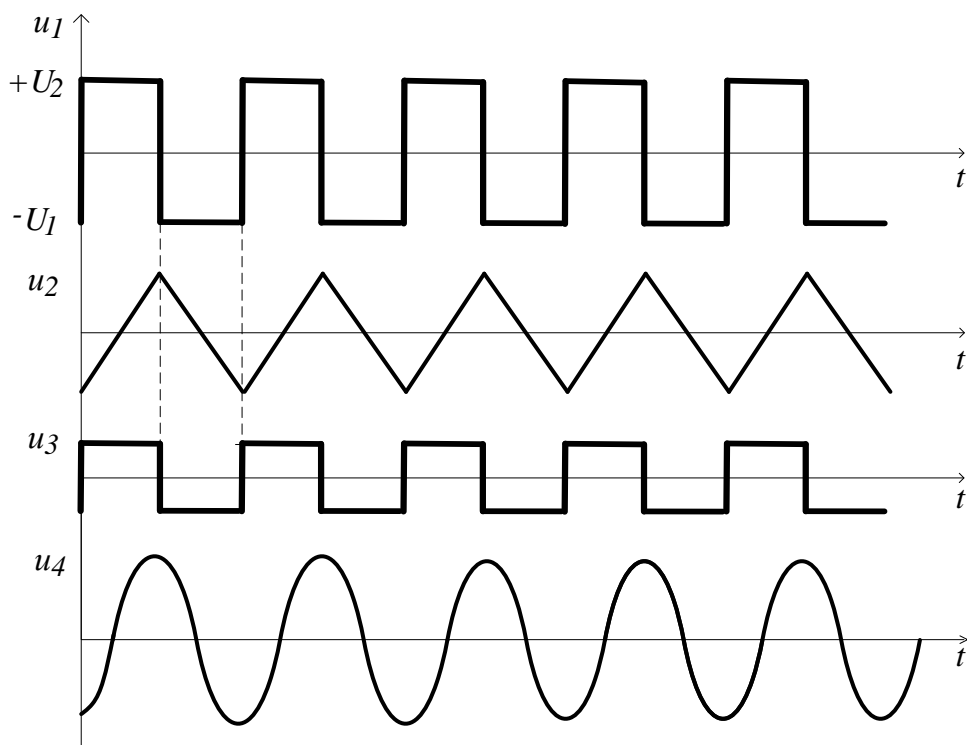


Рис. 6.7. Диаграммы напряжений функционального генератора

ходное напряжение интегратора будет линейно возрастать или убывать в зависимости от полярности входного напряжения. Если на входе сформировать последовательность знакопеременных импульсов  $u_1$  одинаковой амплитуды  $U_1 = U_2$  (напряжение типа меандр), то на выходе получим треугольный сигнал  $u_2$  (рис. 6.7). Его подают на релейный элемент – двухсторонний ограничитель, имеющий гистерезисную передаточную характеристику. Он преобразует треугольное напряжение в меандр  $u_3$ . Этот сигнал управляет ключом, замыкая тем самым цепь ПОС генератора. Когда ключ подключает на вход интегратора положительное напряжение  $U_1$ , напряжение на выходе интегратора нарастает. При достижении порога срабатывания релейного элемента переключается полярность входного сигнала. Напряжение на выходе интегратора становится линейно-падающим. Величина  $U_1$  определяет длительность периода треугольного сигнала  $u_2$ , а, следовательно, и частоту вырабатываемых сигналов. При неравных  $U_1$  и  $U_2$  времена нарастания и спада будут различны. Это приводит к тому, что выходное напряжение релейного элемента имеет вид прямоугольных импульсов со скважностью, отличной от двух. Таким образом, напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  можно управлять частотой выходного сигнала и его скважностью.

Прямоугольные  $u_3$  и треугольные  $u_2$  импульсы образуются на выходах релейного элемента и интегратора соответственно. Для получения синусоидального сигнала  $u_4$  используют дополнительный нелинейный ограничитель треугольного напряжения, построенный на полевых транзисторах или на операционном усилителе с нелинейной отрицательной обратной связью. Остальные блоки функционального генератора не отличаются от используемых в  $RC$ - и  $LC$ -генераторах. Это буферный усилитель и модулятор АМ, выходной аттенюатор, вольтметр для контроля опорного уровня сигнала. Часто в состав функциональных генераторов включают частотомер, с помощью которого создают цифровую шкалу настройки прибора. При этом не требуется градуировка ручек управления частотой и повышается точность ее установки.

Современные функциональные генераторы строят на специализированных больших интегральных схемах, позволяющих получить достаточно высокие технические характеристики приборов и снизить их цену. Тем не менее, стабильность частоты и частотный диапазон этих приборов уступают традиционным генераторам ВЧ, коэффициент нелинейных искажений выше (до процента), чем у сигнала RC-генератора.

## **6.1. Описание лабораторной установки**

В состав лабораторной установки входят исследуемые генераторы – высокочастотный Г4-102 и низкочастотный ГЗ-112, импульсный генератор Г5-54. Функциональный генератор GFG-8219А используется как источник сигнала модуляции. Образцовые приборы, позволяющие провести поверку этих генераторов – электронно-счетный частотомер Agilent 53181А, цифровой мультиметр GDM-8246 и цифровой осциллограф GDS-820С.

### **6.1.1. Основные технические характеристики исследуемых генераторов**

**Генератор сигналов высокочастотный Г4-102.** Структурная схема прибора соответствует традиционной схеме LC-генератора. Диапазон рабочих частот прибора (0,1...50 МГц) разбит на восемь поддиапазонов. Относительная погрешность установки частоты  $\pm 1 \%$ , нестабильность частоты  $\pm (250 \cdot 10^{-6}f + 50)$  Гц. Коэффициент гармоник  $\leq 5 \%$ .

Пределы регулировки среднеквадратического значения выходного напряжения на нагрузке 50 Ом от 0,5 мкВ до 0,5 В. Максимальное значение выходного напряжения (опорный уровень) равно 0,5 В ( $5 \cdot 10^5$  мкВ). Погрешность установки выходного напряжения не более  $\pm 1$  дБ. Предусмотрена возможность амплитудной модуляции от внутреннего генератора гармонического сигнала с частотой 1000 Гц и внешней модуляции с частотой 50...5000 Гц. Коэффициент модуляции устанавливается в пределах 0–90 % ступенями по 10 %. Погрешность установки коэффициента АМ не хуже 10 %.

В генераторе предусмотрен стрелочный вольтметр – для контроля опорного уровня на входе аттенюатора и установки уровня модулирующего напряжения (отметка К на шкале прибора). Предусмотрен некалиброванный выход генератора «1 В», который обычно используют для контроля частоты внешним электронным частотомером.



**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 аттенюатором в пределах 0...70 дБ;
- погрешность установки напряжения на согласованной нагрузке не хуже  $\pm 1,5$  % (что соответствует погрешности выходного аттенюатора порядка  $\pm 0,13$  дБ);
- номинальное значение выходного сопротивления  $50 \pm 5$  Ом.

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

**Генератор импульсов Г5-54.** Прибор вырабатывает видеоимпульсы прямоугольной формы положительной или отрицательной полярности. Максимальная амплитуда основных импульсов  $U_m$  на согласованной нагрузке 500 Ом не менее 50 В; амплитуда регулируется плавно и дискретно. Погрешность установки амплитуды импульсов  $\pm(0,1 U_m)$  В, выходное сопротивление генератора 500 Ом.

Диапазон регулировки длительности импульсов 0,1...1000 мкс (восемь 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.

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

Длительности фронта и среза основных импульсов на согласованной нагрузке 500 Ом не превышает соответственно 50 и 100 нс. Выброс вершины импульса не более 5 %, неравномерность вершины  $\leq 5\%$ .

Генератор вырабатывает также синхроимпульсы положительной и отрицательной полярности с плавно регулируемой амплитудой. Задержка основных импульсов относительно синхроимпульсов  $\Delta t$  (временной сдвиг) регулируется в пределах 0,1...1000 мкс и устанавливается с погрешностью не хуже  $\pm(0,1\Delta t + 0,03)$  мкс.

**Функциональный генератор сигналов специальной формы GFG-8219A.** Прибор предназначен для выработки сигналов прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы в диапазоне частот 0,3 Гц ... 3 МГц (7 поддиапазонов). Относительная погрешность установки частоты порядка  $10^{-4}$ , она обеспечивается встроенным частотомером. Максимальная амплитуда выходного напряжения на согласованной нагрузке 50 Ом не менее 10 В; амплитуда регулируется плавно и дискретно (аттенюатор –20 и –40 дБ). Контроль амплитуды в генераторе не предусмотрен.

Коэффициент нелинейных искажений синусоидального сигнала не хуже 1%, неравномерность частотной зависимости амплитуды сигнала не хуже 1 дБ. Время нарастания сигнала прямоугольной формы не хуже 100 нс, линейность треугольного напряжения не хуже 95 %.

Прибор имеет большое количество режимов работы:

- режим АМ с глубиной 0–100 %, частота внутренней модуляции 400 Гц, внешняя модуляция с частотой до 1 МГц;
- режим ЧМ с девиацией 0... $\pm 5$  %, частота внутренней модуляции 400 Гц, внешней – до 20 кГц;
- режим свипирования частоты (перестройка частоты в пределах 100:1, время свипирования 0,5...30 с; возможно управлять частотой генератора внешним напряжением 0...10 В;
- Перестройка скважности выходного сигнала в пределах 2...12;
- Регулировка постоянного смещения выходного сигнала в пределах –5...+5 В.

Дополнительно прибор обеспечивает выдачу сигналов в формате TTL и КМОП-логики, что полезно при настройке цифровых устройств.

## **6.2. Задание и указания к выполнению работы**

В процессе лабораторного занятия выполняется поверка измерительных генераторов – высокочастотного Г4-102 и импульсного Г5-54 генераторов. Дополнительно (по указанию преподавателя) исследуются параметры низкочастотного *RC*-генератора Г3-112.

### **6.2.1. Поверка высокочастотного генератора Г4-102**

Схема подключения приборов для поверки генератора представлена на рис. 6.8.

Подключите выход генератора 1 V (некалиброванный выход сигнала несущей частоты) к частотомеру. Основной калиброванный выход генератора (разъем  $\mu V$ ) через согласующую нагрузку 50 Ом и коаксиальный тройник подключите к вольтметру и осциллографу. К разъему *AM* генератора Г4-102 подключите функциональный генератор GFG-8219A. Установите режим модуляции *ВНЕШ*, глубину модуляции 0 %. Включите приборы.

Установите режим модуляции *ВНЕШ*, глубину модуляции 0 %. Включите приборы.

#### **6.2.1.1. Измерение погрешности установки частоты ВЧ генератора Г4-102**

Частотомер установите в режим измерения частоты (кнопка *Freq Ch1*), входной фильтр 100 кГц должен быть отключен. Выход генератора 1 V должен быть включен.

Произведите поверку точности установки частоты генератора в трех высокочастотных диапазонах (6-й – 8-й диапазоны). Выберите точку слева, точку справа и точку посередине диапазона на оцифрованных отметках шка-

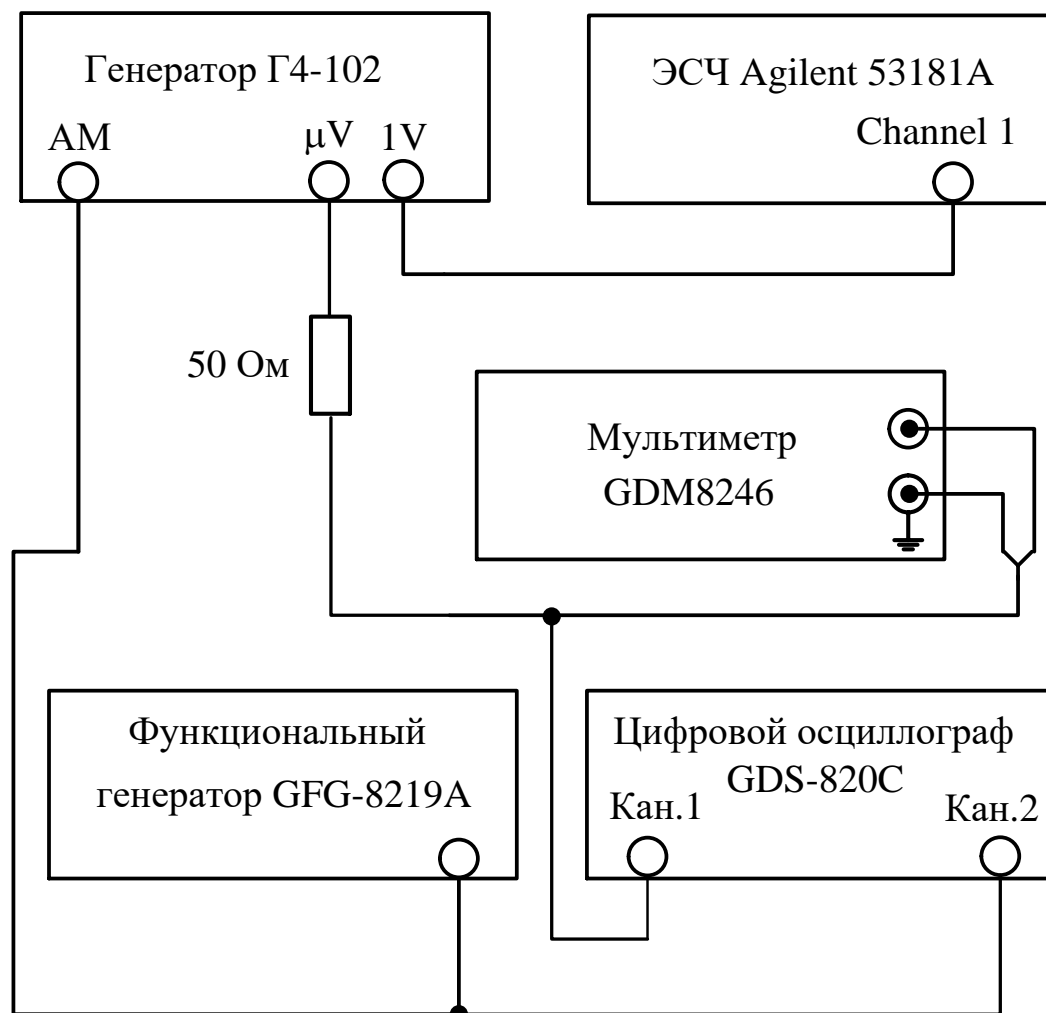


Рис. 6.8. Структурная схема поверки ВЧ генератора Г4-102

лы. В каждой точке измерение частоты проведите дважды: при подходе к отметке слева и справа. Фиксируйте результат измерения с точностью не менее 5 значащих цифр. Рассчитайте относительное отклонение частоты

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

где  $f$  – отметка по шкале генератора,  $f_{\text{изм}}$  – измеренное значение частоты.

За погрешность установки частоты генератора принимают максимальное из двух вычисленных значений отклонения. Результаты поверки занесите в табл. 6.1.

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

Измерение уровня выходного сигнала в лабораторной работе производится цифровым мультиметром GDM-8246, подключенным через согласующую нагрузку 50 Ом к основному выходу генератора (разъем  $\mu V$ ).

На генераторе установите частоту 0,1 МГц (1 поддиапазон), выход  $\mu V$  – включен. Измерение уровня проводите в режиме непрерывной генерации (переключатель *AM* в положение *ВНЕШ.*, переключатель *ГЛУБИНА МОД, %* в положение 0 %). Включите на мультиметре шкалу *mV* и режим измерения переменного напряжения « AC mV » (кнопки *Shift* -> *ACmV*).

Установите плавный регулятор напряжения генератора Г4-102 на отметку 1,0 по черной шкале, дискретный множитель аттенюатора  $\times 10^5$  (черный). Это соответствует среднеквадратическому напряжению выходного сигнала 100 мВ на согласованной нагрузке 50 Ом. При переключении аттенюатора на красную отметку выходное напряжение увеличивается или уменьшается на 10 дБ (в 3,16 раза). Это соответствует показаниям плавного регулятора выходного уровня по красной шкале.

Измерьте выходное напряжение в точках, соответствующих дискретным положениям регулятора (черная и красная шкалы) в диапазоне  $\times 10^5 \dots \times 10^2$ . Рассчитайте погрешность установки напряжения генератора. Результаты измерений и расчетов сведите в табл. 6.1.

### 6.2.1.3. Измерение погрешности установки коэффициента амплитудной модуляции

Установите на генераторе Г4-102 частоту 0,1 МГц, уровень напряжения 0,1 В ( $1,0 \cdot 10^5$  мкВ по черной шкале), коэффициент модуляции 90 %. Исследование режима *AM* проводите в режиме внешней модуляции.

Подайте на вход *AM* синусоидальный сигнал с генератора GFG -8219A (кнопка  $\sim$ ). Установите частоту сигнала модуляции примерно 1000 Гц. Для этого используйте ручку *FREQUENCY* и кнопку частотного диапазона *1 K*. Установите уровень сигнала (ручкой *AMP*) так, чтобы на контрольном индикаторе генератора Г4-102 стрелка показывала на риску *K*. Точную регулировку проводите ручкой *ГЛУБИНА МОД, %* генератора.

Измерение коэффициента модуляции проведите с помощью цифрового осциллографа GDS-820C. Для этого подайте исследуемый сигнал с выхода

$\mu V$  генератора Г4-102 на первый канал осциллографа (*Кан 1*), на второй канал (*Кан 2*) через тройник подайте сигнал модуляции с генератора GFG - 8219A. Нажмите кнопку – *АВТО УСТ.* Осциллограф включит режим наблюдения двух сигналов в автоколебательном режиме с синхронизацией по сигналу модуляции. Для получения изображения сигнала *АМ* используйте режим наложения кадров: *ДИСПЛЕЙ -> Накопление Вкл.* При необходимости используйте кнопку *Обновление* для запуска процесса наложения изображений заново.

Определение коэффициента модуляции выполните, измеряя на экране максимальный  $\Delta_{max}$  и минимальный  $\Delta_{min}$  размеры изображения *АМ* сигнала по вертикали. Для этого используйте курсоры осциллографа (*КУРСОРЫ -> Вертик*). Расстояние между курсорами обозначено  $\Delta$ , перемещение курсоров (вместе или по отдельности) осуществляйте ручкой *УСТАНОВКА*.

Коэффициент модуляции в процентах рассчитайте по формуле

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

Проведите измерения коэффициента модуляции для дискретных значений  $m$  в диапазоне 10...90 % с шагом 20 %. При установке нового значения не забывайте обновлять экран осциллографа (нажимая клавишу *ОБНОВЛ*). Рассчитайте погрешность установки коэффициента модуляции. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 6.2. Зарисуйте или сфотографируйте форму *АМ* сигнала для  $m = 90$  %.

Исследуйте режим *АМ* с другими формами модулирующего сигнала генератора GFG -8219A (треугольник и меандр). Сфотографируйте осциллограммы *АМ* сигнала в этих случаях. Меняя частоту меандра в пределах 10...30 кГц и подстраивая коэффициент развертки для получения удобного масштаба по горизонтали, наблюдайте искажения формы огибающей, возникающих из-за ограниченной полосы частот модулятора генератора Г4-102. Зарисуйте или сфотографируйте полученные осциллограммы для нескольких значений частот модуляции.

## **6.2.2. Измерение параметров прямоугольных импульсов генератора Г5-54**

### **6.2.2.1. Визуальный контроль формы и оценка длительности и амплитуды выходных импульсов генератора Г5-54**

Соберите схему поверки генератора импульсов согласно рис. 6.9. Подключите вход канала *Кан 1* осциллографа и вход частотомера к выходу 1:1

генератора через согласующую нагрузку 500 Ом. (рис. 6.9). Соедините выход *СИНХРОИМПУЛЬСЫ* генератора Г5-54 с входом *ВНЕШ.СИНХР.* осциллографа.

Включите генератор Г5-54. Установите на генераторе режим внутреннего запуска (кнопка *ЗАПУСК* нажата), частоту повторения – 1 кГц (1,0 по белой шкале, белая кнопка  $\times 10^3$ ), временной сдвиг импульсов – 0 мкс, длительность импульсов – 1 мкс, выходное напряжение – 2 В ( $20 \times 0,1$  В).

Включите на осциллографе режим *АВТ УСТ.* Отключите второй канал (кнопку *Кан 2* нажать два раза). Установите режим внешней синхронизации осциллографа (*ЗАПУСК – МЕНЮ -> СИНХР -> Источник -> Внешняя*). Поставьте коэффициент развертки (*ВРЕМЯ/ДЕЛ*) 250 нс/дел. ( $250$  ns).

Установите максимальной амплитуду синхроимпульсов генератора Г5-54 ручкой *АМПЛ.* Отрегулируйте запуск развертки осциллографа ручкой

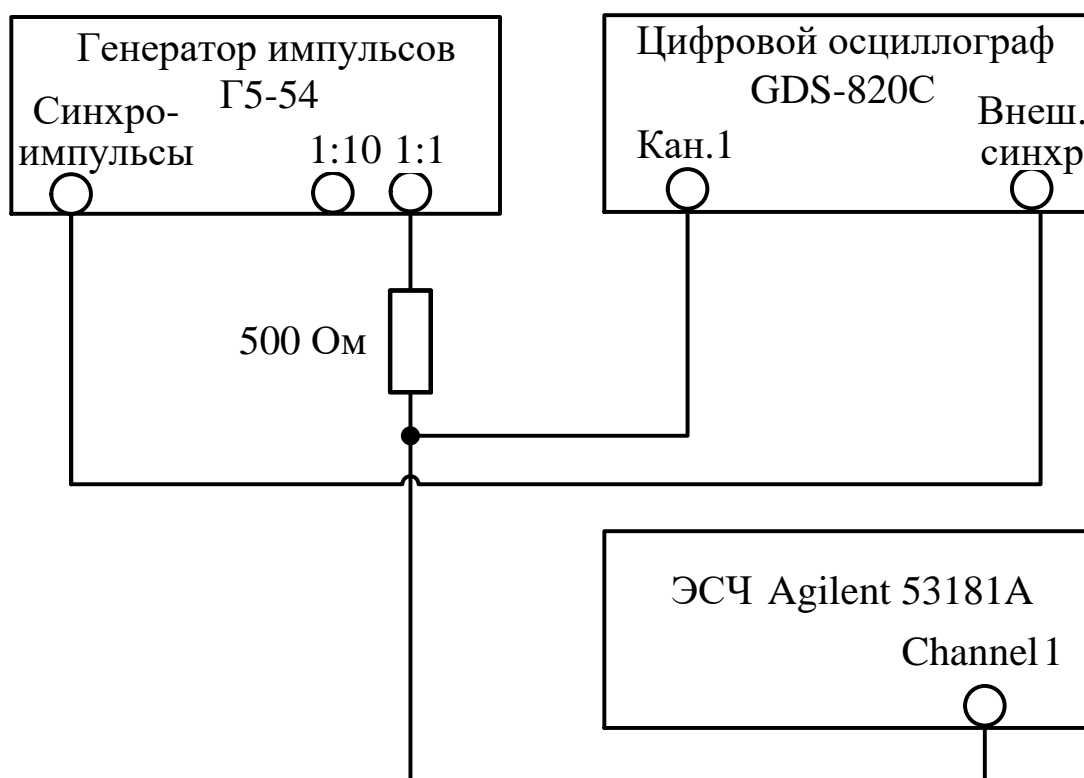


Рис. 6.9. Структурная схема поверки генератора импульсов Г5-54

*УРОВЕНЬ* до получения устойчивого изображения импульса. Установите коэффициент отклонения первого канала 500 мВ/дел и отрегулируйте размер и положение изображения по вертикали и по горизонтали (*СМЕЩЕНИЕ X* и *Y*).

Зарисуйте или сфотографируйте форму импульса. Измерьте параметры импульса, используя режим *ИЗМЕРЕНИЕ* цифрового осциллографа. Зафиксируйте амплитуду импульса ( $V_p-p$ ), время нарастания (*ВР НАРАСТ*) и время спада (*ВР СПАДА*), длительность импульса (+*ДЛИТ*). Режим измерения переключайте, нажимая кнопки *F1-F5* функционального меню осциллографа.

Повторите измерение амплитуды при установленных значениях 3, 4, 5 и 6 В. В каждом случае подбирайте оптимальный коэффициент отклонения канала *I* осциллографа. Рассчитайте погрешности установки амплитуды импульса. Результаты занесите в табл. 6.3.

Установите исходную амплитуду 2 В и повторите измерения временных параметров импульса при установленной длительности импульса генератора 10 и 100 мкс. Для этих случаев подбирайте коэффициент развертки так, чтобы импульс был бы виден на экране целиком. Рассчитайте погрешности установки длительности импульса. Результаты занесите в табл. 6.4.

#### *6.2.2.2. Измерение погрешности установки частоты следования импульсов генератора Г5-54*

Подключите вход частотомера к выходу генератора импульсов. Установите длительность импульса 1 мкс. Проведите измерение частоты следования импульсов, устанавливая плавный регулятор частоты генератора на отметках 1, 3 белой шкалы и 7, 10 черной шкалы на всех поддиапазонах генератора. Рассчитайте относительную погрешность установки частоты, результаты занесите в табл. 6.1.

#### **6.2.3. Измерение параметров НЧ-генератора Г-112 (по указанию преподавателя)**

Сигнал с выхода НЧ-генератора через согласующую нагрузку 50 Ом и коаксиальный тройник подайте на вход частотомера и мультиметра (рис. 6.10). Переключатель вида сигнала генератора Г3-112 поставьте в положение «~», ослабление – 0 дБ. Ручку плавной регулировки выходного сигнала установите в крайнее правое положение, соответствующее максимальному значению уровня.

##### *6.2.3.1. Измерение погрешности установки частоты генератора Г3-112*

Установите на частотомере режим измерения частоты (Freq Ch1). Включите входной фильтр частотомера 100 кГц. Произведите поверку точ-



ности 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. Достаточно фиксировать результат с 5 значащими цифрами. Вычислите относительные отклонения (в процентах) частоты  $\delta f = \frac{f - f_{\text{изм}}}{f_{\text{изм}}} 100 \%$ , где  $f$  – отметка по шкале генератора;  $f_{\text{изм}}$  – измеренное значение частоты. За погрешность установки принимают максимальное из двух полученных значений. Результаты поверки занесите в табл. 6.1.

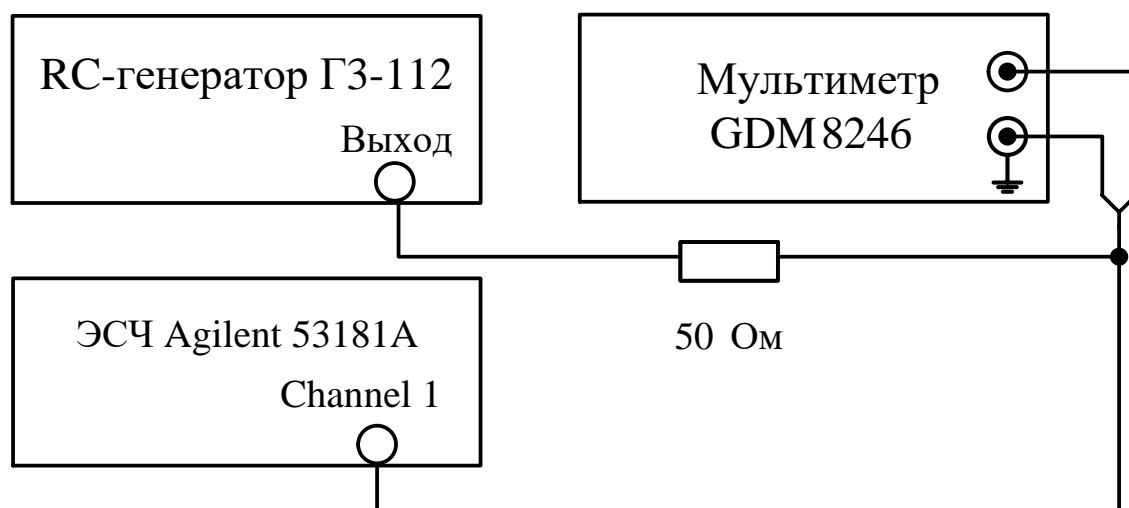


Рис. 6.10. Структурная схема поверки НЧ генератора ГЗ-112

### 6.2.3.2. Измерение погрешности установки ослабления выходного аттенюатора генератора ГЗ-112.

Эти измерения производят с помощью цифрового вольтметра, подключаемого к генератору через согласующую нагрузку 50 Ом. Переключите вольтметр в режим ACV (измерение переменного тока, шкала В).

Установите частоту генератора 1 кГц, ослабление 0 дБ. Плавной регулировкой выходного напряжения генератора добейтесь на вольтметре показаний 1 В (опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$ ). Последовательно переключая ослабление аттенюатора в пределах 0...50 дБ, измеряйте значение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . При ослаблении до 20 дБ и более используйте милливольтовый режим вольтметра AC mV, включаемый последовательным нажатием кнопок

*Shift* -> *ACV*. Измеренное ослабление рассчитайте в децибелах по формуле  $A = 20 \lg(U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ОП}})$ ,  $U_{\text{ОП}} = 1 \text{ В}$ . Результаты измерений занесите в табл. 6.5.

### 6.3. Содержание отчета

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

### 6.4. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 6.1

Установленное значение (по шкале генератора)	Измеренное значение	Относительная погрешность установки, %	Паспортное значение предела погрешности, %

Таблица 6.2

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

Таблица 6.3

Установленная амплитуда импульса, В	Измеренная амплитуда $V_{p-p}$ , В	Погрешность установки амплитуды, В	Паспортное значение погрешности, В

Таблица 6.4

Установленная длительность импульса, мкс	Измеренная длительность, мкс	Измеренное время нарастания, мкс	Измеренное время спада, мкс	Паспортная погрешность установки длительности, мкс

Таблица 6.5

Установленное	Измеренное	Измеренное	Погрешность	Паспортное

ослабление, дБ	напряжение, В	ослабление, дБ	установки ослабления, дБ	значение погрешности, дБ

## 6.5. Контрольные вопросы

1. Что такое измерительный генератор сигналов? Чем он отличается от других типов источников сигналов?
2. Как делятся измерительные генераторы по функциональному назначению? Какие типы генераторов гармонических сигналов используют в радиоизмерениях?
3. Почему на низких частотах автогенераторы с  $LC$ -контурами не обеспечивают высокой стабильности частоты?
4. Чем отличаются генераторы гармонических сигналов низких и высоких частот?
5. Что такое модуляция радиосигнала? Какие виды модуляции применяют в генераторах ВЧ? Почему в НЧ-генераторах модуляция не используется?
6. Как в генераторах ВЧ осуществляют точную установку выходного напряжения?
7. Что такое выходной аттенюатор измерительного генератора, для какой цели его применяют?
8. Для чего предназначены генераторы импульсов? Какую форму сигнала имеет реальный выходной сигнала? Как характеризуют качество его формы?
9. Для чего в генераторах импульсов предусматривают дополнительный выход синхроимпульсов? Чем они отличаются от основных импульсов генератора?
10. Укажите особенности и принцип действия функционального генератора сигналов сложной формы. Какие возможности имеют эти генераторы?

## 7. 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.

### 7.1. Амплитудно-частотная характеристика и ее измерение

Для характеристики линейных радиотехнических устройств наиболее часто применяют *коэффициент передачи*. Обычно это комплексный коэффициент передачи по напряжению, равный отношению комплексных амплитуд

напряжений на выходе  $\dot{U}_2 = U_{m2} \cdot \exp(j\varphi_2)$  и на входе цепи  $\dot{U}_1 = U_{m1} \cdot \exp(j\varphi_1)$ :

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

*Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)* называют модуль коэффициента передачи по напряжению  $|K(f)|$ . Для характеристики режима передачи мощности через устройство с входа на выход часто используют *затухание (ослабление)* – логарифмический параметр, связанный с модулем коэффициента передачи

$$A, \text{ дБ} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}} \right) = -20 \lg |K(f)|.$$

В случае активных усилительных устройств применяют *коэффициент усиления*, который отличается обратным отношением мощностей:

$$K_p, \text{ дБ} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right) = -A, \text{ дБ}.$$

Наиболее простой метод измерения АЧХ – определение отношения амплитуд выходного и входного напряжений гармонического сигнала  $U_2(f_i)/U_1(f_i)$  в отдельных частотных точках  $f_i$  (*измерение АЧХ по точкам*) с последующей интерполяцией всей зависимости.

На практике часто снимают зависимость напряжения на выходе исследуемого устройства  $U_2(f_i)$  от частоты при фиксированной (единичной) амплитуде гармонического напряжения  $U_1(f_i)$  на входе. На рис. 7.1, а, приведена общая схема включения четырехполюсника между источником гармонического напряжения с внутренним выходным импедансом  $Z_{\text{ген}}$  и нагрузкой, характеризующейся импедансом  $Z_{\text{н}}$ .

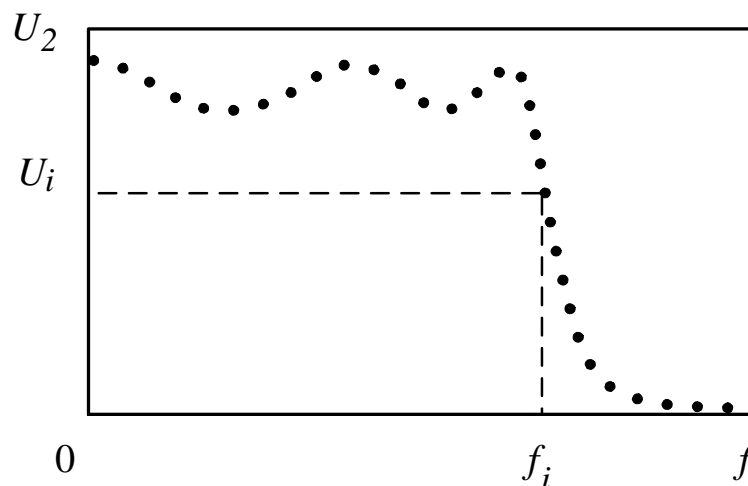
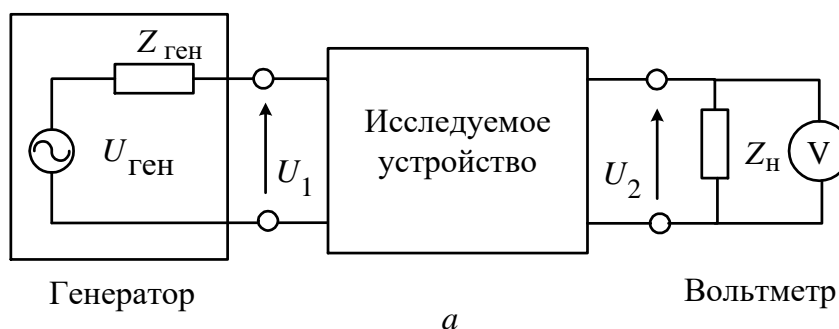


Рис. 7.2. Измерение АЧХ по точкам:

Выходное напряжение зависит от сопротивления нагрузки, подключенного к выходу устройства. При измерении АЧХ во многих случаях сопротивление нагрузки задают стандартным (например, 50, 75, 600 Ом). Второй важный момент – влияние на АЧХ выходного сопротивления генератора  $Z_{\text{ген}}$ . Если АЧХ определяют как отношение амплитуд выходного и входного напряжений  $U_2/U_1$ , то влияние  $Z_{\text{ген}}$  на форму характеристики отсутствует. Однако во многих практических задачах под АЧХ понимают частотную зависимость отношения напряжения на выходе устройства и напряжения холо-

стого хода генератора  $U_2/U_{\text{ген}}$  (то есть  $Z_{\text{ген}}$  включают в измерительную схему). Входное напряжение цепи  $U_1$  при этом может иметь зависимость от частоты, поэтому вид АЧХ будет зависеть от величины  $Z_{\text{ген}}$ . В этом случае при измерении АЧХ сопротивление генератора должно быть заранее оговорено. Несоответствие выходного сопротивления и сопротивления нагрузки заданным величинам приводит к появлению систематических погрешностей методического характера.

Описанный метод измерения АЧХ по точкам реализуют, как правило, с использованием перестраиваемого генератора гармонических колебаний и вольтметра переменного тока (см. рис. 7.1, а). Генератор последовательно настраивают на ряд выбранных частот, а напряжение на выходе исследуемого устройства измеряют вольтметром. Поскольку напряжение гармоническое, допускается использовать любые типы вольтметров переменного тока - амплитудные, среднеквадратические или вольтметры средневыпрямленного значения. Амплитуду напряжения генератора  $U_{\text{ген}}$  поддерживают постоянной. При необходимости, амплитуду входного напряжения цепи  $U_1$  измеряют вторым вольтметром (в последнем случае определяют АЧХ в виде  $U_2(f)/U_1$ ). Зависимость, построенная по результатам измерений с использованием интерполяции между точками, представляет собой АЧХ исследуемой цепи (рис. 7.1, б).

Данный способ обеспечивает достаточно высокую точность измерений. Основными источниками погрешностей метода измерения АЧХ по точкам 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) влияние конечного входного импеданса вольтметра на выходное напряжение цепи;
- 5) погрешность интерполяции АЧХ между измеренными точками.

Кроме этого, необходимо учитывать влияние несоответствия значения внутреннего сопротивления генератора заданной стандартной величине (в случае отсутствия вольтметра на входе устройства).

Вклад первых трех источников в общую погрешность измерения может быть уменьшен использованием приборов более высокого класса точности.

Вольтметр надо выбирать с входным сопротивлением, значительно превышающим сопротивление нагрузки устройства. Он должен иметь минимальную входную емкость (с учетом паразитной емкости соединительного кабеля). Для уменьшения погрешностей интерполяции следует увеличить число частотных точек и выбрать оптимальный метод расчета.

Основной недостаток измерений АЧХ по точкам – 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 АЧХ). При длительных измерениях сказывается влияние температуры, дрейфа питающих напряжений на исследуемое устройство. Эти недостатки преодолены в панорамных измерителях АЧХ, где используют генератор с автоматической электронной перестройкой частоты.

## 7.2. Частотные параметры полосовых фильтров

Чаще всего объектом измерения АЧХ являются частотно-избирательные цепи и устройства, в частности *фильтры*. Это устройства осуществляют частотную селекцию сигналов. Различают фильтры низких частот (ФНЧ), высоких частот (ФВЧ), полосно-пропускающие (ППФ) и полосно-заграждающие (ПЗФ) фильтры. Определим их частотные параметры на примере полосно-пропускающих фильтров (далее -полосовых фильтров ПФ). На рис. 7.2 представлены типичные частотные характеристики коэффициента передачи по напряжению  $K(f)=U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$  полосовых фильтров в линейном (рис. 7.2, а) и логарифмическом (рис. 7.2, б) масштабах по уровню.

Ось частот обычно имеет линейный масштаб. Однако для фильтров, работающих с большим коэффициентом перекрытия  $f_{\text{В}}/f_{\text{Н}}$  вид графика АЧХ в линейном масштабе неудобен - низкочастотная часть АЧХ сжата и плохо видна. В логарифмическом масштабе по частоте график оказывается растянутым в НЧ области, поэтому наблюдающийся там склон АЧХ хорошо виден.

Основными частотными параметрами, характеризующими форму АЧХ реального ППФ, являются:



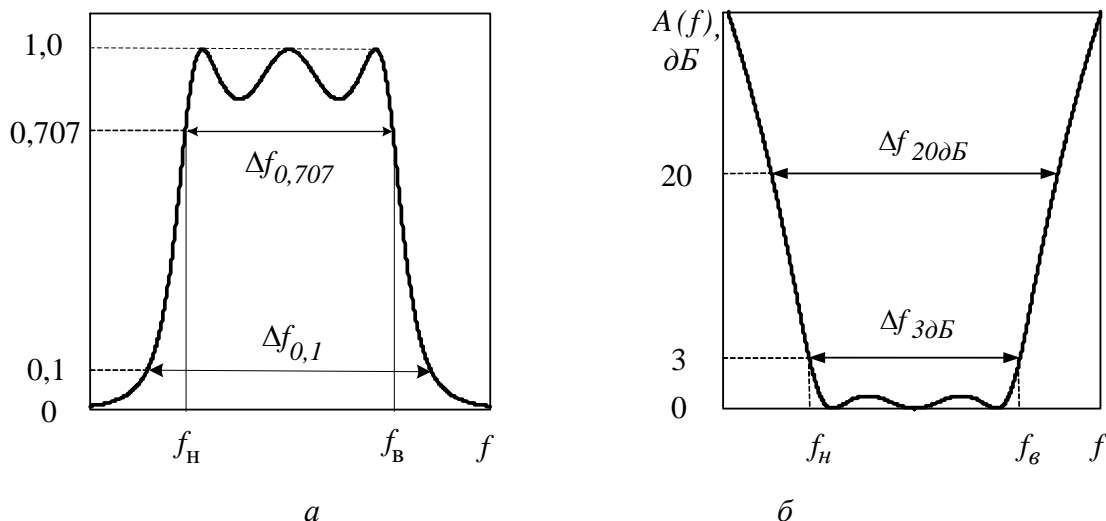


Рис. 7.3. Типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра:  
*a* – в линейном масштабе по уровню (относительные единицы);  
*б* – в логарифмическом масштабе по уровню (дБ).

Максимальный коэффициент передачи  $K_0$  и минимальное затухание  $A_0$   
 $K_0 = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$ ,  $A_0 = -20 \lg K_0$ , дБ. Частоту  $f_0$ , на которой  $K(f_0) = K_0$  и  $A(f_0) = A_0$ , называют частотой минимального затухания. Часто при исследовании фильтров строят нормированную АЧХ  $K(f)/K_0$  и нормированную зависимость затухания (ослабления) фильтра

$$A(f) = -20 \lg(K(f)/K_0) = A(f) - A_0,$$

представляющую собой «перевернутую» АЧХ (рис. 7.2, б).

Полоса пропускания  $\Delta f$  – диапазон частот, в которой затухание передачи не превышает заданного значения. Ширину полосы пропускания, измеренную по уровню ослабления 3 дБ ( $\frac{K(f)}{K_0} = 0.707$ ), обозначают

$\Delta f_{0.707} = \Delta f_{3 \text{ дБ}} = \Delta f_0$ . Ширину полосы по уровню 20 дБ ( $\frac{K(f)}{K_0} = 0.1$ ) обо-

значают  $\Delta f_{0.1} = \Delta f_{20 \text{ дБ}}$ . Нижняя и верхняя частоты среза  $f_H$  и  $f_B$  полосно-пропускающего фильтра соответствуют границам полосы  $\Delta f_0$ .

Коэффициент прямоугольности  $K_{\Pi}$  – отношение двух полос пропускания, измеренных по разным уровням (обычно 0.707 и 0.1 или 3 и 20 дБ)

$$K_{\Pi} = \Delta f_{0.707} / \Delta f_{0.1} = \Delta f_{3 \text{ дБ}} / \Delta f_{20 \text{ дБ}}.$$

Коэффициент прямоугольности показывает степень близости АЧХ реального фильтра к прямоугольной АЧХ идеального фильтра.

Крутизна скатов АЧХ за пределами полосы пропускания  $S_{\text{АЧХ}} = \left| \frac{d}{df}(A(f)) \right|$ . Этот параметр позволяет оценить степень подавления мешающего сигнала при заданной его расстройке по частоте от границ полосы пропускания фильтра. На практике измеряют усредненное значение  $S_{\text{АЧХ}}$ , вычисленное как модуль отношения разности некоторых выбранных значений затухания  $A_1$  и  $A_2$  (например, 10 и 20 дБ) к разности соответствующих им частот  $[f(A_1) - f(A_2)]$ :

$$\bar{S}_{\text{АЧХ}} = \left| \frac{A_1 - A_2}{f(A_1) - f(A_2)} \right|, \text{ дБ/кГц.}$$

Примером полосового фильтра является одиночный колебательный контур. Его АЧХ существенно отличается от АЧХ идеального ПФ и имеет невысокий  $K_{\text{П}}$ . Однако ввиду своей простоты колебательный контур широко применяется в качестве частотно-избирательной цепи.

АЧХ полосно-пропускающих фильтров мало меняется в пределах полосы пропускания и спадает до нуля вне ее. Для исследования АЧХ такого вида целесообразно использовать некоторые приемы, упрощающие процедуру измерения. Сначала необходимо найти максимум АЧХ и оценить частотный диапазон измерения. Далее надо выбрать в его пределах достаточное количество частотных точек, в которых измеряют выходное напряжение, поддерживая амплитуду входного напряжения постоянной.

Если АЧХ фильтра имеет один явно выраженный максимум и монотонно спадающие склоны (как у одиночного контура), то процедуру можно упростить, переходя к измерениям по дискретным уровням выходного напряжения. В этом случае фиксируют частоты, на которых выходное напряжение составляет 90, 80, 70, ..., 20, 10% от максимума. Измерение частоты при фиксированном уровне выходного напряжения упрощает работу оператора и снижает требования к точности вольтметра. Однако такой метод не подходит для измерения в пределах плоской части АЧХ ПФ.

Для определения частот среза и полосы пропускания не обязательно измерять всю АЧХ. Частоты среза фильтров можно определить отдельно, используя калиброванный уровень амплитуды генератора. Для этого находят входное  $U_{1 \text{ max}}$  и выходное  $U_{2 \text{ max}}$  напряжение в максимуме АЧХ. Затем

увеличивают напряжение генератора в 1,41 раза ( $U_{1 \max} \cdot 1,41$ ). Уменьшая частоту генератора, добиваются, чтобы выходное напряжение фильтра равнялось бы прежнему значению  $U_{2 \max}$ . Значение частот генератора является нижней частотой среза фильтра по уровню 0,707. Увеличивая частоту, аналогичным образом находят верхнюю частоту среза. Частоты среза фильтра по уровню 0,1 находятся аналогично, но напряжение генератора необходимо увеличить в 10 раз. Данный способ позволяет использовать простые некалиброванные индикаторы уровня напряжения вместо вольтметра, что удобно при измерениях в диапазонах ВЧ и СВЧ.

### **7.3. Задание и указания к выполнению работы**

#### **7.3.1. Описание лабораторной установки**

В лабораторной работе в качестве источника гармонического напряжения используется функциональный генератор сигналов специальной формы SFG-71013. Принцип действия генератора – прямой цифровой синтез формы сигнала. Он позволяет производить цифровой ввод значения частоты с высокой точностью (0.1 Гц). Генератор предназначен для выработки сигналов прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы в диапазоне частот 0.1 Гц ...3 МГц, погрешность установки частоты порядка  $20 \cdot 10^{-6}$ . Максимальная амплитуда выходного напряжения на согласованной нагрузке 50 Ом не менее 10 В; амплитуда регулируется плавно и дискретно (встроенный аттенюатор 40дБ). Коэффициент нелинейных искажений синусоидального сигнала не хуже -35 дБн, неравномерность АЧХ сигнала не более 1дБ.

Выходное напряжение генератора устанавливается регулятором АМПЛ и контролируется по внешнему вольтметру №1. Выходное напряжение фильтров измеряется вольтметром №2. Оба прибора – аналоговые милливольтметры переменного тока типа ВЗ-38. Они градуированы в среднеквадратических значениях синусоидальных сигналов. Предел измерения вольтметра 0.1мВ... 300В разбит на 12 поддиапазонов. Переключение поддиапазонов осуществляется входным аттенюатором, градуированным в максимальных значениях шкалы вольтметра. Если оно кратно 10, то отсчет производится по самой верхней шкале вольтметра, содержащей 10 делений. Если кратно 3 – отсчет производится по второй шкале, содержащей 30 дел. Погрешность измерения напряжения вольтметрами не хуже 4% в частотном диапазоне 20

Гц...5 МГц. Входное сопротивление прибора 4 МОм, входная емкость – не более 30 пФ.

Лабораторный макет (рис. 7.3) содержит два активных полосовых фильтра ПФ-1, ПФ-2 (положения переключателя 3...4) и колебательный контур (положение 2). В положении 1 переключателя осуществляется непосредственное соединение генератора с вольтметром 2, что используют для контроля вольтметров (они должны показывать одно и то же значение).

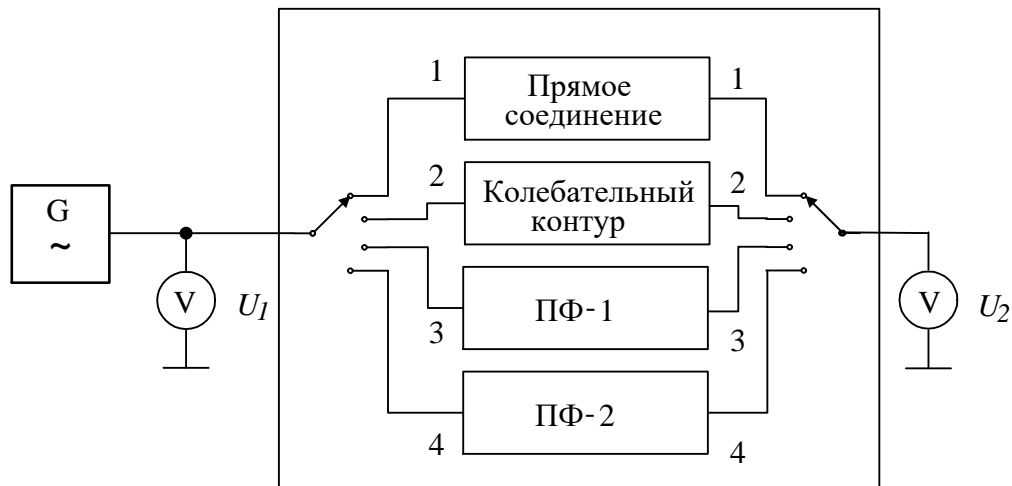


Рис. 7.3. Структурная схема измерительной установки

В работе исследуются частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров ПФ-1 (частотный диапазон 2...5 кГц) и ПФ-2 (частотный диапазон 50...3000 Гц). Измеряются параметры колебательного контура с резонансной частотой порядка 500 Гц.

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

Включите питание приборов и макета. Подайте с генератора на вход макета гармонический сигнал 1 кГц. Для этого установите органы управления генератора в следующие положения:

1. Кнопкой ФОРМА выберите гармонический вид генерируемого сигнала  $\sim$  (значок выводится в углу шкалы);
2. Вращением ручки ЧАСТОТА установите значение 1.000 кГц. Для точной установки кнопками ПРЕФ -> ◀ или ▶ выберите активный разряд на цифровом индикаторе, который меняется при вращении ручки ЧАСТОТА. Рекомендуется установить указатель в разряде десятых долей кГц.

3. Включите кнопку ВЫХОД ВКЛ (загорится индикатор). Сигнал с генератора поступит на макет и вольтметры.

Произведите установку напряжения генератора и выбор предела измерения вольтметров. Поставьте переключатель макета в положение 1 (непосредственное соединение), тогда оба вольтметра будут показывать значение выходного напряжения генератора. Выберите предел шкалы вольтметров 1В и ручкой регулировки амплитуды АМПЛ генератора установите его напряжение равным 0,5 В.

Измерьте по точкам частотную характеристику фильтра ПФ 1 (переключатель макета в положении 3). На первом этапе найдите максимум АЧХ фильтра в частотной области 100...5000Гц. Далее, перестраивая частоту генератора, приблизительно определите крайние точки диапазона измерения, в которых напряжение выходного сигнала падает в 15..20 раз. Затем в этом диапазоне выберите 15...20 частотных точек измерения АЧХ. Точки располагайте чаще на участках резкого изменения АЧХ (на склонах АЧХ).

В каждой частотной точке вольтметром №2 измерьте выходное напряжение. При этом входное напряжение поддерживайте равным 0.5 В по показаниям вольтметра №1. Выбирайте предел измерения вольтметра №2 так, чтобы отклонение стрелки было бы максимально (в правой части шкалы). Результаты измерения занесите в таблицу по форме 7.1.

Рассчитайте АЧХ  $K(f)=U_2/U_1$  и постройте его график, используя линейные масштабы по частоте и уровню. Постройте также график вносимого затухания фильтра  $A(f)$  в логарифмическом масштабе по уровню ( в дБ).

Проведите по аналогичной методике измерение АЧХ фильтра ПФ 2 (положение 4 переключателя макета). Частотная характеристика фильтра ПФ2 расположена в области частот 50...3000 Гц, сдвинута в область малых частот и имеет довольно широкий плоский участок без резко выраженного максимума.

Используйте для построения графика АЧХ ПФ 2 логарифмический масштаб частот. Для построения логарифмической шкалы частот обозначьте ось абсцисс ( $f$ , Гц). Затем нанесите на нее с равномерным шагом отметки, соответствующие десятичному логарифму частоты, выраженной в герцах (рис.7.4).

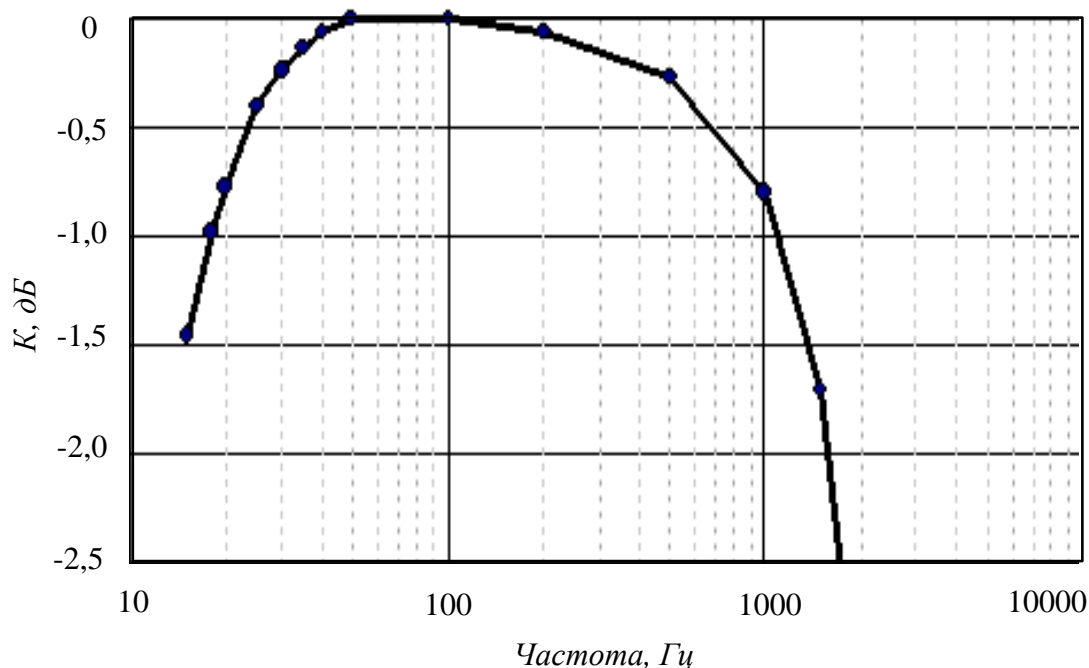


Рис. 7.4. График АЧХ фильтра в логарифмическом масштабе по оси частот

Оцифровку оси частот произведите, используя сами значения частот (в нашем случае 10, 100, 1000, 10 000 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...10 000 Гц. Очевидно, что точка нулевой частоты на оси абсцисс при этом отсутствует, поэтому график начинается с низшей частоты диапазона измерения (в данном случае – с 10 Гц).

### 7.3.3. Измерение коэффициента прямоугольности фильтра ПФ 1

Для определения частот среза  $f_H$  и  $f_B$  полосового фильтра ПФ1 по уровню 0.707 (3 дБ) используйте следующую методику измерения:

1. Поставьте переключатель рода работ в положение 3;
2. Настройте генератор на частоту максимума АЧХ (точка минимального затухания);
3. Н генераторе нажмите кнопку ПРЕФ (загорится индикатор), а затем кнопку -40 дБ (соответствует ослаблению выходного напряжения в 100 раз);

4. Ручкой регулировки амплитуды генератора АМПЛ установите по вольтметру №1 (предел шкалы 10 мВ) напряжение генератора  $U_{1\max} = 5$  мВ;
5. Зафиксируйте напряжение  $U_{2\max}$  на выходе фильтра по показаниям вольтметра №2 (предел шкалы 10 мВ);
6. Ручкой АМПЛ увеличьте напряжение на входе фильтра в 1,41 раз (7,07 мВ);
7. Далее уменьшайте частоту генератора до тех пор, пока показание выходного вольтметра не достигнет первоначального значения  $U_{2\max}$ .
8. Запишите значение частоты генератора; она является нижней частотой среза фильтра.
9. Повышая частоту генератора относительно частоты максимума АЧХ, аналогичным образом найдите верхнюю частоту среза.

Рассчитайте полосу пропускания фильтра ПФ 1 по уровню 0,707 (3 дБ) как разность найденных частот среза.

Полоса пропускания фильтра по уровню 0,1(20 дБ) находится аналогично:

1. Снова настройте генератор на частоту минимального затухания (максимум АЧХ);
2. Проверьте, чтобы аттенюатор генератора был включен;
3. Установите исходное напряжение генератора 5 мВ;
4. Зафиксируйте напряжение выходного вольтметра  $U_{2\max}$  ;
5. Отключите аттенюатор нажатием кнопок ПРЕФ и – 40 дБ и ручкой АМПЛ установите входное напряжение равным 0.5 В (по вольтметру № 1, предел шкалы 1 В);
6. Затем уменьшайте частоту генератора до тех пор, пока показание выходного вольтметра снова не станет равным  $U_{2\max}$  ;
7. Запишите значение частоты генератора; она является нижней частотой среза фильтра по уровню 0,1.
8. Аналогичным образом (повышая частоту генератора) найдите верхнюю частоту среза.

Рассчитайте полосу пропускания фильтра ПФ 1 по уровню 0,1 (20 дБ) и коэффициент прямоугольности по формуле

$$K_{\Pi} = \Delta f_{0.707} / \Delta f_{0.1} .$$

Определите усредненную крутизну скатов по уровням 3 и 20 дБ слева и справа по формулам

$$\bar{S}_{\text{АЧХ В}} = \left| \frac{20 - 3}{f_{\text{В}}(20 \text{ дБ}) - f_{\text{В}}(3 \text{ дБ})} \right|, \quad \bar{S}_{\text{АЧХ Н}} = \left| \frac{20 - 3}{f_{\text{Н}}(20 \text{ дБ}) - f_{\text{Н}}(3 \text{ дБ})} \right|.$$

#### 7.3.4. Измерение АЧХ колебательного контура

Поставьте переключатель макета в положение 2. Напряжение генератора установите равным 0,5 В. Изменяя частоту генератора в районе 500 Гц с шагом 10 Гц (для выбора активного разряда используйте кнопки ПРЕФ, ◀ и ▶), определите резонансную частоту  $f_0$  колебательного контура по максимуму показаний выходного вольтметра. Запишите ее значение.

Измерьте АЧХ контура способом дискретных уровней. Найдите максимум АЧХ контура и установите выходное напряжение в максимуме равным 100 мВ (шкала вольтметра №2 100 мВ). Затем уменьшайте частоту генератора и последовательно определите частоты, на которых выходной вольтметр покажет 70, 50, 30 и 10 мВ (уровни АЧХ 0,7; 0,5; 0,3 и 0,1 от максимума). Аналогичным образом проведите измерения при увеличении частоты генератора вверх от резонансной.

Запишите результаты измерений в таблицу по форме 7.2, по полученным данным постройте график нормированной АЧХ колебательного контура

$$K(f) / K_0 = U_2(f) / 100 \text{ мВ} .$$

По графику определите полосу пропускания  $\Delta f_0$  контура по уровню 0,707, рассчитайте его добротность  $Q = f_0 / \Delta f_0$  и коэффициент прямоугольности  $K_{\Pi} = \Delta f_{0.707} / \Delta f_{0.1}$ .

#### 7.4. Содержание отчета

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



## 7.5. Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 7.1

$f$ , Гц (кГц)					
$U_2$ , мВ					
АЧХ					
A, дБ					

Таблица 7.2

$U$ , В	$U_{\max}$	$0.7 U_{\max}$	$0.5 U_{\max}$	$0.3 U_{\max}$	$0.1 U_{\max}$
$f$ , Гц					

## 7.6. Контрольные вопросы

1. Что такое амплитудно-частотная характеристика цепи? Что такое затухание цепи? В каких случаях удобнее использовать затухание, а не АЧХ?
2. Опишите методику измерения АЧХ по точкам.
3. Какие требования предъявляют к генератору, используемому при измерении АЧХ по точкам?
4. Как параметры вольтметров влияют на результаты измерения АЧХ?
5. В каком случае значение выходного сопротивления генератора сигналов влияет на результаты измерения АЧХ?
6. Укажите погрешности, возникающие при измерении АЧХ по точкам и пути их уменьшения.
7. Какие частотные параметры фильтров используют для характеристики их свойств?
8. В каких случаях целесообразно использовать логарифмический масштаб частот на графиках АЧХ?
9. В каких случаях целесообразно использовать измерение АЧХ по дискретным уровням? Где этот способ непригоден?
10. Укажите методику измерения полосы пропускания фильтра, не требующую определения всей АЧХ. Какие преимущества имеет такой метод измерения?

### 1. Основные понятия метрологии

*Метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Физическая величина* – свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Физическими величинами, например, являются напряжение, электрическая емкость, мощность.

*Значение физической величины* – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

*Истинное значение физической величины* – значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Так как истинное значение, как правило, неизвестно, то вводят понятие действительного значения физической величины.

*Действительное значение физической величины* – значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

*Единица физической величины* – физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

*Измерение* – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

*Результат измерения* – значение величины, найденное путем ее измерения.

*Погрешность результата измерения* – отклонение результата измерения  $x$  от истинного значения измеряемой величины  $X$ .

*Абсолютная погрешность измерения* – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины:

$$\Delta x = x - X.$$

Вместо истинного значения  $X$  иногда берут действительное значение  $X_d$ :

$$\Delta x \approx x - X_d.$$

*Относительная погрешность измерения* – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta_x = \Delta x / X \approx \Delta x / X_{\text{д}}$$

Так как в большинстве случаев  $X \approx x$ , то относительную погрешность часто определяют по формуле

$$\delta_x \approx \Delta x / x.$$

*Точность измерений* – качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Количественно точность измерений выражается значением, обратным модулю относительной погрешности:  $T = |\delta_x|^{-1}$ .

Если относительная погрешность  $\delta_x = 10^{-4}$ , то точность измерений будет  $T = 10^4$ .

*Приведенная погрешность средства измерений* – относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность  $\Delta x$  средства измерений отнесена к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или части диапазона. Так если предел измерений прибора на данном поддиапазоне  $X_N$ , то приведенная погрешность  $\gamma$ , %, определяется по формуле

$$\gamma = (\Delta x / X_N) 100.$$

*Принцип измерения* – совокупность физических явлений, положенных в основу измерений средства измерений.

*Метод измерения* – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

*Единство измерений* – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений позволяет сопоставлять результаты измерений, выполненные с использованием различных методов и средств измерений в различных местах и в разное время.

Мероприятия по обеспечению единства и требуемой точности измерений установлены законодательно.

## 2. Классификация погрешностей измерений

По характеру выражения погрешности подразделяются на абсолютные и относительные.

По характеру проявления погрешности можно подразделить на систематические и случайные.

*Систематическая погрешность* – это составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

В ряде случаев систематические погрешности можно предсказать, рассчитать или даже измерить, а затем учесть путем введения поправки в результат измерения.

*Случайная погрешность* – составляющая погрешности результата измерения случайно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

Такие погрешности нельзя заранее учесть и ввести в виде поправки. Эти погрешности вызваны совместным действием ряда причин, носящих случайный характер: внутренними шумами измерительных приборов, наводками на входные цепи, пульсациями напряжения питания и т. д.

Таким образом, погрешность измерения можно представить в виде суммы систематической  $\theta$  и случайной  $\varepsilon$  погрешностей

$$\Delta = \theta + \varepsilon.$$

Наряду с перечисленными погрешностями могут возникать также грубые погрешности и промахи.

*Грубая погрешность* – это погрешность, существенно превышающая ожидаемое значение погрешности. Они могут возникать при возникновении скачков питающего напряжения. Эти погрешности исключают из дальнейшего рассмотрения.

*Промах* – погрешность, обусловленная неправильными действиями оператора, возникающими, например, при настройке прибора перед измерениями или при считывании результата измерения. Промахи тоже исключают из рассмотрения.

Выделяют также следующие составляющие погрешности: инструментальную, методическую и субъективную.

*Методическая погрешность*  $\Delta_M$  – это составляющая систематической погрешности, связанная с несовершенством принятого метода измерения.

На рис. П2.1 представлена схема генератора с внутренним сопротивлением  $R_i$  и ЭДС  $E$ , запитывающего нагрузку  $R_H$ , через которую течет ток  $I$ .

Для измерения этого тока последовательно с нагрузкой включают амперметр  $A$ , сопротивление которого равно  $R_A$  (рис. П2.1). Ток в цепи при этом изменяется на значение  $I'$ . Возникающая в то же время погрешность измерения равна

$$\Delta I = I - I' = E / (R_i + R_H + R_A) - E / (R_i + R_H).$$

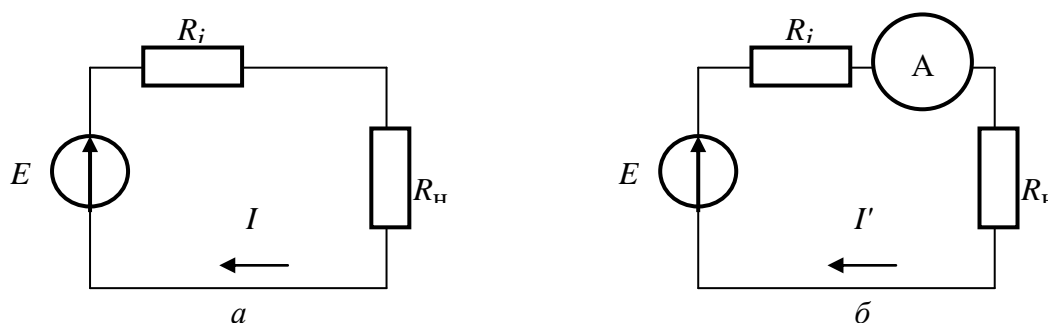


Рис. П2.1

Очевидно, что методическая погрешность в этом примере будет мала при условии, что

$$R_A \ll R_i + R_H.$$

*Инструментальная погрешность*  $\Delta_{и}$  – составляющая погрешности, обусловленная погрешностью применяемого средства измерения. Причинами появления инструментальных погрешностей являются неточности, допущенные при изготовлении и регулировке средств измерений, старение элементов электрических цепей, а также внешние воздействия на средство измерения климатических, электрических, механических факторов.

*Субъективная погрешность* – эта составляющая погрешности обусловлена индивидуальными особенностями оператора, проводящего измерения.

*Аддитивная погрешность*  $a$  – составляющая погрешности, не зависящая от измеряемой величины  $x$ .

*Мультипликативная погрешность*  $b x$  – составляющая погрешности измерений, зависящая от измеряемой величины  $x$  (прямо пропорциональная ей,  $b$  – коэффициент пропорциональности).

Суммарная абсолютная погрешность определяется выражением

$$\Delta = a + b x.$$

Источниками аддитивной погрешности служат трение в опорах подвижной части измерительного механизма, вибрации, наводки и т. д.

Источниками мультипликативной погрешности являются отклонения условий эксплуатации средств измерения от нормальных: повышенная или пониженная температура, влажность.

Аддитивная и мультипликативная погрешности могут носить как систематический, так и случайный характер.

В зависимости от скорости изменения измеряемой величины различают *статические* и *динамические погрешности*. Статическая погрешность имеет место при измерении постоянной во времени величины. Динамическая погрешность обусловлена реакцией средства измерения на скорость изменения измеряемой величины. Эта погрешность зависит от динамических свойств (инерционности) средства измерения, частотного спектра входного сигнала.

Классификация измерений по точности подразумевает наличие трех групп.

*Измерения с максимально возможной точностью*, которую могут обеспечить наиболее совершенные образцы современной измерительной техники. К этой группе относят измерения, связанные с созданием и эксплуатацией эталонов, а также измерения, проводимые при уникальных научных исследованиях. Для таких измерений характерна тщательная оценка погрешности измерений с широким применением математических методов.

*Контрольно-поверочные измерения*, проводимые с целью аттестации новых средств измерения, а также надзора за состоянием измерительной техники в процессе ее эксплуатации. Погрешность таких измерений не должна превышать заданного, заранее установленного предела.

*Технические измерения*, при которых погрешность, как правило, оценивают приближенно по метрологическим характеристикам средств измерений.

Для оценки точности измерений очень важно установить, как оценивать систематические, методические и инструментальные погрешности, какие характеристики случайных погрешностей необходимы для такой оценки, как рассчитывать такие характеристики.

### 3. Единицы измерения Международной системы СИ

Наименование величины	Единицы		
	Наименование	Обозначение	
		международное	русское
<i>Основные единицы</i>			
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
Сила электрического тока	ампер	A	А
Термодинамическая температура	кельвин	K	К
Количество вещества	моль	mol	моль
Сила света	кандела	cd	кд
<i>Дополнительные единицы</i>			
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср

Размерность физической величины ( $\dim$ ) – качественная ее характеристика, представляющая произведение основных величин данной системы единиц. Так для системы СИ размерность любой величины  $X$  может быть представлена в виде

$$\dim X = L^a M^b T^c I^d \theta^e J^f,$$

где  $L, M, T, I, \theta, J$  – размерности основных величин (соответственно длины, массы, времени, силы электрического тока, температуры и силы света);  $a, b, c, d, e, f$  – показатели степеней. Размерности некоторых наиболее часто встречающихся в радиоэлектронике производных единиц указаны далее в таблице.

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
1	2	3	4	5
Частота	$T^{-1}$	герц	Hz	Гц
Энергия	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт
Количество электричества, заряд	$T I$	кулон	C	Кл
Электрическое напряжение	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В
Электрическая емкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	F	Ф
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	$\Omega$	Ом
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	S	См
Поток магнитной индукции	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Wb	Вб
Магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	T	Тл
Индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	H	Гн

Окончание таблицы

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Напряженность электрического поля	$\text{LMT}^{-3}\text{I}^{-1}$	вольт на метр	V/m	В/м
Диэлектрическая проницаемость	$\text{L}^{-1}\text{M}^{-1}\text{T}^4\text{I}^2$	фарад на метр	F/m	Ф/м
Магнитная проницаемость	$\text{LMT}^{-2}\text{I}^{-2}$	генри на метр	H/m	Гн/м

*Основное уравнение метрологии (измерений)*

Если имеется некоторая физическая величина  $X$ , то результат ее измерения записывается в виде  $X = q[X]$ , где  $q$  – числовое значение величины  $X$ , а  $[X]$  – единица измерения.

Например, если за единицу измерения напряжения принят 1 В, то значение напряжения электрической сети  $U = q[U] = 220 [1 \text{ В}] = 220 \text{ В}$ .

*При записи результата измерения одинаково важны оба компонента: и численное значение и единица измерения. Отсутствие хотя бы одного из них делает результат измерения неопределенным.*

#### 4. 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	$\mu$	мк
$10^{-9}$	нано	n	н
$10^{-12}$	пико	p	п
$10^{-15}$	фемто	f	ф
$10^{-18}$	атто	a	а



## 5. Децибелы и отношения

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

$$P_2/P_1 = 10 \lg (P_2/P_1). \quad (\text{П5.1})$$

1 децибел = 0,1 бел (1 Б =  $\lg(P_2/P_1)$ ).

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

$$U_2/U_1 = 20 \lg (U_2/U_1). \quad (\text{П5.2})$$

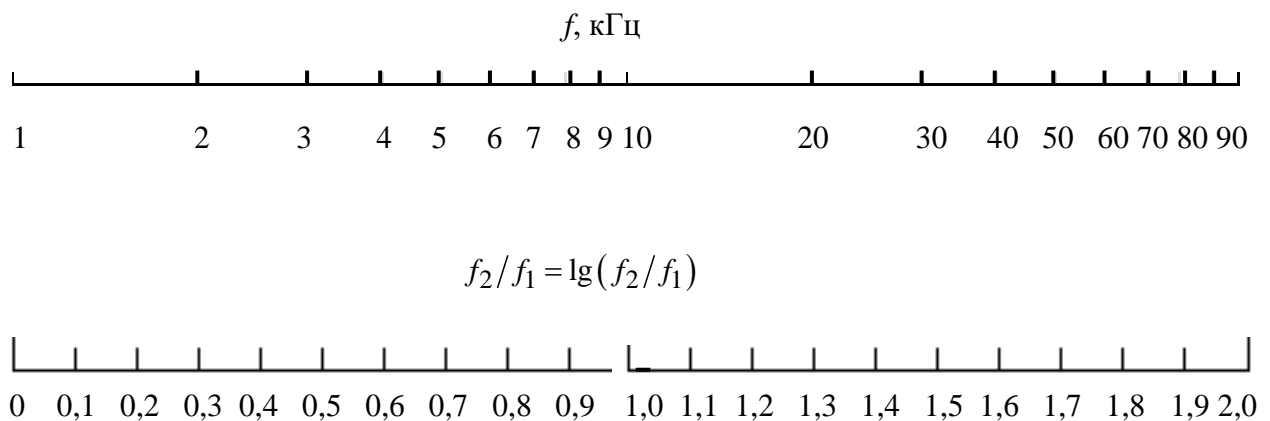
Далее приведена таблица соответствия отношения двух величин в децибелах и относительных единицах.

Децибелы	Отношение мощностей	Отношение напряжений	Децибелы	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	$3,162 \cdot 10^4$	177,80
3,0	1,995	1,413	50,0	$10^5$	316,20
4,0	2,512	1,585	55,0	$3,162 \cdot 10^5$	562,30
5,0	3,162	1,778	60,0	$10^6$	$10^3$
6,0	3,981	1,995	65,0	$3,162 \cdot 10^6$	$1,778 \cdot 10^3$
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	$10^{15}$	$3,162 \cdot 10^7$

## 6. Логарифмический масштаб

Логарифмический масштаб часто используется наряду с линейным. Например, при построении графиков АЧХ можно использовать логарифмический масштаб по оси частот (П5.1). На рисунке показан принцип построения логарифмического масштаба частоты в диапазоне от 1 до 100 кГц (верхняя ось). На нижней оси показан десятичный логарифм отношения частот.

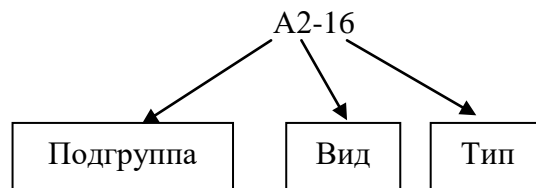
При этом принято  $f_1 = 1$  кГц ( $f_1$  не может быть равно 0 из-за невозможности деления на 0). Например, частоте  $f_2 = 2$  кГц соответствует  $\lg(f_2/f_1) = 0,3$ , частоте  $f_2 = 8$  кГц соответствует 0,9 и т. д.



При выборе логарифмического масштаба вертикальной оси обычно используется отношение величин по напряжению (П5.2).

## 7. Обозначения радиоизмерительных приборов











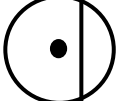

По характеру измеряемых величин радиоизмерительные приборы делятся на подгруппы, по основной выполняемой функции – на виды, а по совокупности технических характеристик и очередности разработки – на типы. Всего имеется 20 подгрупп для отечественных приборов, каждая из которых состоит из нескольких видов, 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.



Далее 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
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
Ч3	Частотомеры электронно-счетные

## 8. Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы и вспомогательные части

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		Переменный ток	
Электромагнитный прибор		Постоянный и переменный ток	
Электродинамический прибор		Общий зажим для многопредельных приборов	
Ферродинамический прибор		Зажим, соединенный с экраном	
Электростатический прибор		Зажим для заземления	
Индукционный прибор		Класс точности при нормировании погрешности в процентах от предела шкалы	1,5
Постоянный ток		—	—

## 9. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- краткие теоретические сведения и основные расчетные соотношения;
- структурную схему измерительной установки;
- таблицы результатов измерений по установленной форме с внесенными расчетами;
- графики экспериментальных измерений и расчетных зависимостей;
- выводы.

К отчету прилагается протокол измерений, не заменяющий отчет.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Кафедра теоретических основ радиотехники

---

## ОТЧЕТ

По лабораторной работе

**Название работы**

по дисциплине

**«ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И РАДИОИЗМЕРЕНИЙ»**

Выполнил(и)

Студент(ы) гр.

ФИО

Проверил

ФИО

Санкт-Петербург

20\_\_ г.

### Список рекомендуемой литературы

Данилин А. А., Лавренко Н. С. Приборы и техника радиоизмерений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.

Дворяшин Б. В. Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2005.

Сигов А. С., Нефедов А. И. Метрология, стандартизация и технические измерения: учеб. для вузов / под ред. А. С. Сигова. М.: Высш. шк., 2008.

Метрология и радиоизмерения: учеб. для вузов / под ред. В. И. Нефедова. М.: Высш. шк., 2003.

Мирский Г. З. Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1986.

Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН\_ПРЕСС, 2007.

Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов. М.: ДМК ПРЕСС, 2011.

ГОСТ 16263–70 ГСОЕИ. Метрология. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1991.

## Оглавление

Введение.....	3
1. Электромеханические измерительные приборы.....	4
2. Измерение напряжений электронными вольтметрами .....	18
3. Электронно-лучевой осциллограф .....	41
4. Измерение фазового сдвига .....	53
5. Измерение параметров линейных компонентов цепей .....	64
6. Поверка измерительных генераторов .....	76
7. Измерение амплитудно-частотных характеристик с помощью генератора вольтметра.....	98
Приложения.....	111
Список рекомендуемой литературы.....	123

Баруздин Сергей Анатольевич,  
Данилин Александр Алексеевич

## Основы метрологии и радиоизмерений

Лабораторный практикум

Редактор Н. В. Лукина

---

Подписано в печать 00.00.15. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 7,75.  
Гарнитура «Times New Roman». Тираж 350 экз. Заказ

---

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