

Электронный осциллограф

Электронными осциллографами называются приборы, предназначенные для визуального наблюдения, исследования и фотографирования электрических процессов. Они применяются для измерения самых различных электрических величин: амплитуд напряжений и токов, полных сопротивлений, частоты, фазовых сдвигов, длительностей импульсов и др., а также многих неэлектрических величин, преобразуемых с помощью датчиков в электрические. Малая инерционность осциллографа позволяет исследовать переменные величины в широком диапазоне частот от постоянного тока до сотен мегагерц и более. При использовании вспомогательных устройств на экране прибора можно воспроизвести вольтамперные, частотные, амплитудные, фазовые, переходные и другие характеристики исследуемых установок.

Осциллографы разделяются на три основные группы: 1) с непрерывной (периодической) развёрткой, 2) универсальные с непрерывной и ждущей развёртками, 3) скоростные или сверхвысокочастотные.

Индикаторное устройство осциллографа

Электроннолучевая трубка. Индикаторами осциллографов обычно являются низковольтные электроннолучевые трубки (ЭЛТ) с электростатической фокусировкой и управлением. Исследуемый процесс наблюдается в виде светящейся кривой, возникающей на экране трубки в результате его бомбардировки узким пучком быстролетающих электронов.

Схематическое устройство ЭЛТ и типовая схема её включения показаны на рис.1. Трубка представляет собой стеклянную колбу, в которой создан высокий вакуум. Внутри колбы помещаются: нагреватель катода; катод (источник электронов); электрод, управляющий яркостью изображения (модулятор); фокусирующий анод (первый анод); ускоряющий анод (второй анод), от напряжения на котором зависит чувствительность трубки к напряжению на отклоняющих пластинах; горизонтально отклоняющие пластины; вертикально отклоняющие пластины; ускоритель (третий анод), представляет собой проводящий слой на боковой поверхности колбы вблизи экрана; флюоресцирующий экран, который преобразует кинетическую энергию электронов луча в световое излучение.

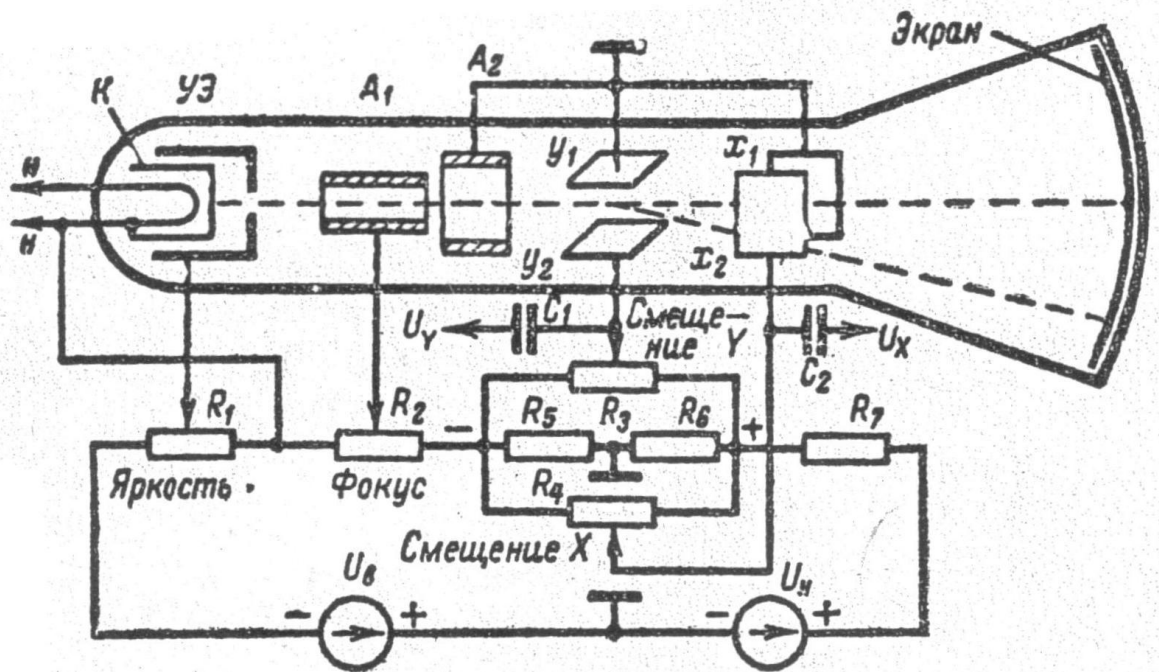


Рис.1. Схематическое устройство и схема включения осциллографической электроннолучевой трубки.

Электронная пушка. Источником электронов служит подогревный катод K . Яркость свечения экрана регулируется посредством изменения отрицательного смещения на управляющем электроде УЭ потенциометром R_1 (примерно в пределах от 0 до - 60 в). Величина смещения определяет количество электронов, проходящих через отверстие в центре основания цилиндра и образующих электронных луч.

Электроны приобретают требуемую скорость под воздействием полей двух цилиндрических анодов A_1 и A_2 . На первый анод подаётся положительное относительно катода напряжение порядка 300-1000 в, а на второй анод – порядка 800-4000 в.

Фокусировка пучка электронов в узкий луч, сходящийся на экране трубки, происходит в электростатическом поле между анодами A_1 и A_2 и достигается подбором напряжения на аноде A_1 .

Экран трубки. Предназначен для визуального наблюдения; он покрывается виллемитом или сернистым цинком, дающим зелёное свечение, хорошо воспринимаемое глазом. Для фотографирования пригодны также экраны, покрытые вольфрамовыми солями, дающими синее свечение. Все экраны обладают свойством послесвечения, которое в большинстве трубок длится в течение десятых долей секунды после прекращения воздействия на экран электронного луча. Для исследования очень медленных, а также быстротекающих одиночных или редко повторяющихся процессов используются экраны с длительным послесвечением—порядка секунд.

Управление электронным лучом осуществляется с помощью двух пар взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин y_1y_2 и x_1x_2 . При

отсутствии на этих пластинах напряжений электронный луч, двигаясь прямолинейно, создаёт светящееся пятно в центре экрана. При подаче на пару пластин напряжение между ними возникает электрическое поле, отклоняющее электронный луч в сторону положительно заряженной пластины. При этом происходит смещение пятна на экране, величина которого пропорциональна приложенному напряжению.

При подведении к паре отклоняющих пластин переменного напряжения с частотой выше 15-20 Гц на экране наблюдается прямая линия, в которую сливаются отдельные положения светящегося пятна. При одновременном воздействии переменных напряжений на пластины y_1, y_2 и x_1, x_2 на экране воспроизводится кривая сложной траектории перемещения пятна.

Потенциал второго анода должен быть равен среднему потенциалу отклоняющих пластин во избежание возникновения между ними отклоняющего поля, могущего нарушить фокусировку электронного луча. Поэтому второй анод трубки, а с ним и положительный полюс источника высоковольтного напряжения U_0 соединяют с корпусом; при этом катод трубки оказывается под высоким отрицательным потенциалом относительно корпуса. Для установки начального положения светящегося пятна на пластины трубки падают постоянные напряжения, регулируемые по величине и полярности потенциометрами R_3 и R_4 .

Чувствительность трубки S численно равна величине отклонения пятна на экране (в миллиметрах) при подведении к пластинам напряжения 1 в. Обычно $S=0,1 \div 0,5$ мм/в. Различают чувствительность трубки по вертикальному отклонению S_y и по горизонтальному отклонению S_x .

Чувствительность осциллографа S_0 по каналу Y или X определяется наибольшей длиной светящейся линии на экране в миллиметрах, приходящейся на 1 в амплитудного (с размахом от пика до пика) значения входного напряжения. При синусоидальной форме напряжения длина линии на экране соответствует двойному амплитудному значению поданного напряжения в вольтах. Поэтому чувствительность в пиковых или действующих значениях напряжения следует определять по формулам:

$$S_{o.пик} = \frac{l}{2,82U}; \quad S_{o.действ} = \frac{l}{U},$$

где l —длина светящейся линии, мм;

U —подводимое напряжение, измеренное вольтметром, в.

При этом следует помнить, что чувствительность S_0 зависит от установки входного аттенюатора и ручки регулировки усиления канала. При необходимости её определяют для различных положений ручек управления при подаче на вход канала синусоидального напряжения.

Блок-схема универсального электронного осциллографа

Элементы схем осциллографов. Большинство современных осциллографов широкого применения (С1-2—С1-9) являются универсальными; они позволяют производить исследования, как непрерывных периодических процессов, так и импульсивных сигналов. Типовая блок-схема такого осциллографа представлена на рис.2.

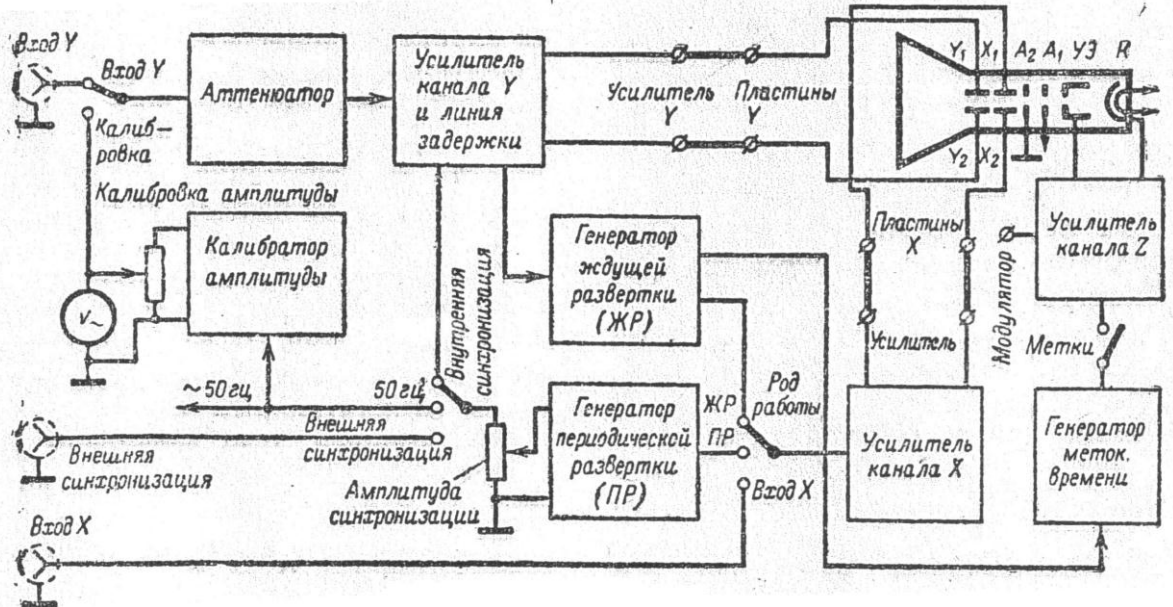


Рис.2. Блок-схема универсального осциллографа.

Канал Y вертикального отклонения луча. Исследуемый сигнал подаётся на вход канала Y непосредственно или через выносной делитель напряжения. При большой амплитуде этого сигнала он ограничивается калиброванным входным аттенюатором, который обычно имеет высокоомный вход; в одном из положений переключателя аттенюатора часто предусматривают уменьшение входного активного сопротивления канала до 50, 75 или 100 ом с целью согласования его входа с соответствующим выходными цепями исследуемых устройств.

Усилитель канала Y даёт возможность исследовать слабые сигналы. Он делается широкополосным и характеризуется полосой пропускания, в пределах которой коэффициент усиления изменяется не более чем в $\sqrt{2}$ раз (или на 3 дб) от его максимального значения. При необходимости исследования очень медленных процессов нижняя граница полосы доводится до нулевой частоты путём использования усилителя постоянного тока. В схеме усилителя предусматривают регулировку коэффициента усиления, а вместе с ним — амплитуды отклонения пятна на экране по оси Y . Выходные каскады усилителя канала Y часто выполняются по двухтактной схеме; в этом случае на отклоняющие пластины подают переменные напряжения, симметричные относительно корпуса, что улучшает фокусировку электронного луча.

Если амплитуда исследуемых сигналов достаточно велика, а их частота выходит за границы полосы пропускания усилителя, то эти сигналы можно подавать непосредственно на отклоняющие пластины, отключив от последних выход усилителя; при таком включении входное сопротивление канала значительно возрастает.

Канал X горизонтального отклонения. Для наблюдения на экране формы кривой напряжения, поданного на вход Y , в канале горизонтального отклонения включается генератор периодической развёртки. Вырабатываемое им напряжение пилообразной формы $u_{\text{пил}}$ после усиления воздействует на пластины x_1, x_2 . Период этого напряжения $T_{\text{пил}}$ состоит из времени прямого хода ΔT_1 , в течение которого напряжение изменяется линейно и заставляет электронный луч равномерно перемещаться по экрану в горизонтальном направлении, развёртывая во времени изображение исследуемой кривой, и времени обратного хода ΔT_2 , в течение которого напряжение быстро возвращается к исходному значению. Обычно линию обратного хода, мешающую наблюдениям, устраняют автоматической подачей на управляющий электрод трубки в течение времени ΔT_2 большого отрицательного смещения, запирающего электронный луч.

Для получения на экране неподвижного изображения N периодов исследуемого напряжения частота последнего f_y должна в целое число раз N превышать частоту пилообразного напряжения $f_{\text{пил}}$, т.е. $f_y/f_{\text{пил}}=N$, что достигается подбором частоты $f_{\text{пил}}$. Поэтому генераторы развёртки работают в широком и плавно регулируемом диапазоне частот, разбитом на несколько поддиапазонов и согласованном с полосой пропускания канала Y . Вследствие неизбежных колебаний частот f_y и $f_{\text{пил}}$ их целочисленное отношение может с течением времени самопроизвольно нарушаться, что приведёт к перемещению изображения на экране и необходимости частой регулировки частоты $f_{\text{пил}}$. Чтобы избежать этого, частоту генератора $f_{\text{пил}}$ обычно синхронизируют частотой f_y , т.е. заставляют частоту $f_{\text{пил}}$ автоматически следовать за всеми изменениями частоты f_y при сохранении постоянства их отношения. Частоту $f_{\text{пил}}$ можно синхронизировать также с частотой внешнего сигнала, подводимого к гнезду «внешняя синхронизация», или с частотой 50 гц питающей сети. Для получения устойчивой синхронизации амплитуду синхронизирующего напряжения можно усиливать с помощью специального усилителя или усилителя канала X . Выходной каскад усилителя канала часто делают по двухтактной схеме, что уменьшает трапецеидальные искажения.

Для исследования кратковременных импульсов, которые при периодической развёртке наблюдаются в виде острых всплесков, применяют *генераторы ждущей развёртки*. Каждый импульс исследуемого напряжения запускает генератор, который выдаёт на горизонтально отклоняющие пластины одиночный импульс пилообразного напряжения определённой длительности с амплитудой, необходимой для развёртки на всю ширину экрана. Для длительности ждущей развёртки (а, следовательно, и ширину кривой наблюдаемого импульса) можно изменять ступенями. Так как начало развёртки запаздывает относительно запускающего импульса на десятки

доли микросекунды, то для наблюдения фронта импульса в канал Y вводят *линию задержки* (искусственную длинную линию). Запуск генератора может производиться по выбору импульсами положительной или отрицательной полярности. Иногда применяются специальные генераторы коротких импульсов для синхронного запуска ждущей развёртки и внешних устройств.

Во многих осциллографах имеется также канал Z , позволяющий модулировать яркость свечения экрана внешним сигналом; подводимым к гнезду «модулятор».

Устройства для измерения амплитуды и длительности сигнала. Некоторые осциллографы содержат устройства для измерения амплитуды и длительности исследуемых сигналов. Измерение амплитуды напряжения сигнала с точностью порядка 5-10 % производится (при включённой развёртке) сравнением её с известной амплитудой калибровочного напряжения частотой 50 *Гц*, выдаваемого калибратором амплитуды. При одинаковой длине линий, созданных обоими сигналами на экране, измеряемая амплитуда отсчитывается по шкале делителя напряжения или диодного вольтметра, включённого на выходе калибратора. Для измерения высоты изображений на экран накладывают прозрачную сетку.

Если развёртка осциллографа калибрована по длительности или скорости, то длительность исследуемого сигнала можно измерить по горизонтальной шкале с временным масштабом, наложенным на экран. В других случаях применяются генераторы меток времени, которые через строго определённые интервалы времени выдают импульсы, воздействующие на управляющий электрод (или пластины y_1y_2) трубки и создающие на изображении яркостные (или амплитудные) метки. Длительность сигнала с точностью до 3-5 % определяется по числу меток, укладываемых в пределах изображения сигнала.

Некоторые осциллографы (С1-7, С1-12, С1-27) позволяют одновременно наблюдать и исследовать два электрических процесса. Для этой цели используются двухлучевые электроннолучевые трубки, содержащие внутри общей колбы две самостоятельные системы электронных пушек с управляющими электродами.

Одновременное наблюдение нескольких процессов возможно и на экране обычного однолучевого осциллографа при использовании *коммутирующей приставки*, с помощью которой исследуемые напряжения поочерёдно подаются на вход Y и наблюдаются на различных регулируемых по высоте уровнях. Практическое применение получили коммутаторы трёх типов: механические, электронные и тиратронные.

Блок-схемы универсальных осциллографов весьма разнообразны и могут в деталях отличаться от рассмотренной. В ряде осциллографов отсутствуют вход канала X , канала Z , калибраторы амплитуды или длительности. Простейшие осциллографы (С1-1, ЭО-4) имеют только периодическую развёртку. Телевизионные осциллографы (С1-9, С1-13) в дополнение к элементам схемы универсального осциллографа, содержат специальные устройства, позволяющие детально исследовать телевизионный сигнал от

целого полукадра до части любой строки раstra, наблюдать частотные характеристики каналов телевизионного приёмника и т.п.

Скоростные осциллографы (С1-10, С1-11 и др.) составляют особую группу. Они предназначены для исследования и регистрации (обычно путём фотографирования) кратковременных периодических или однократных процессов весьма малой длительности (порядка долей микросекунды). Для получения достаточной яркости изображения на экране при большой скорости его развёртывания электронным лучом в осциллографах применяются трубки, работающие при повышенном (до 10 кВ и более) напряжении на втором аноде и имеющие экраны с длительным послесвечением. Осциллографы имеют лишь ждущую развёртку, калиброванную по длительности. Для усиления исследуемых сигналов применяются усилители или лампы с бегущей волной, рассчитанные на полосу пропускания порядка десятков и сотен мегагерц. В высоковольтных осциллографах усилители отсутствуют и исследуемые сигналы с большой амплитудой (от десятков вольт) подаются непосредственно на отклоняющие пластины трубки.

Измерения с помощью осциллографа

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

Измерение сопротивления. Для измерения сопротивления последовательно с ним включается эталонное сопротивление для измерения тока (см. рис.3), а неизвестное сопротивление определяют по закону Ома.

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

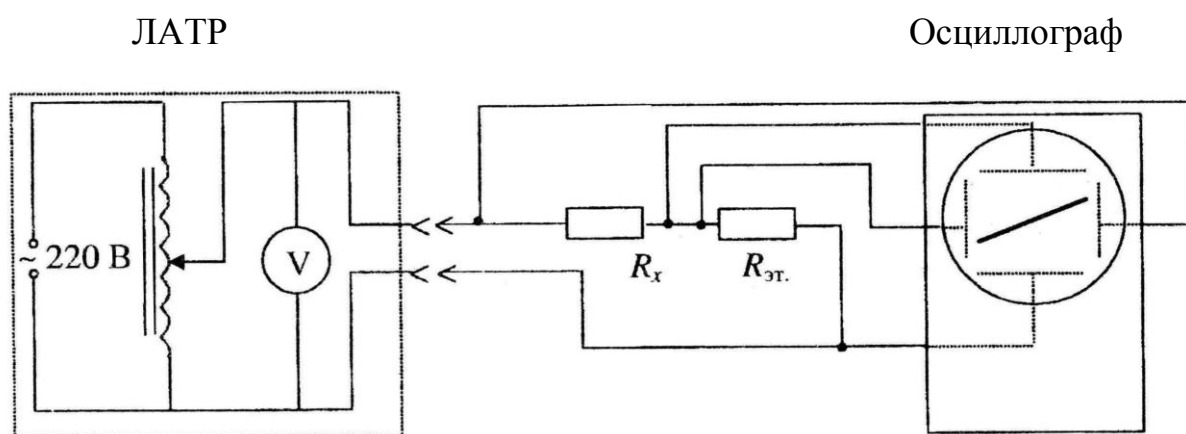


Рис.3 Схема подключения приборов

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

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

где k_x —чувствительность по оси «X».

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

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

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

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

Измерение ёмкости конденсатора. Для сравнения ёмкостей конденсаторов их поочерёдно включают в колебательный контур ($L_2 C_{изм}$), индуктивно связанный с генератором переменной ЭДС (ЗГ) через катушку L_1 (рис. 4).

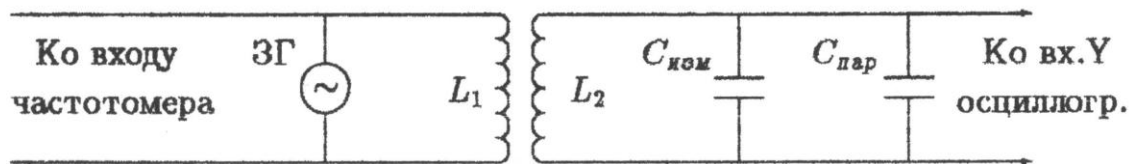


Рис. 4. Схема подключения приборов

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

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

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

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{\nu_{эм}^2 C_{эм}},$$

где $C_{эм}$ - ёмкость эталонного конденсатора;
 $\nu_{эм}$ - частота эталонного конденсатора.

Затем, чтобы определить ёмкость неизвестного конденсатора его подключают к катушке вместо эталонного конденсатора, измеряют резонансную частоту и по формуле

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

определяют электроёмкость неизвестного конденсатора.

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

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

(на рисунке 5 показан график зависимости заряда конденсатора от времени), можно найти закон изменения

тока в электрической цепи, содержащей индуктивность, ёмкость и активное сопротивление для двух моментов времени, различающихся на один период:

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

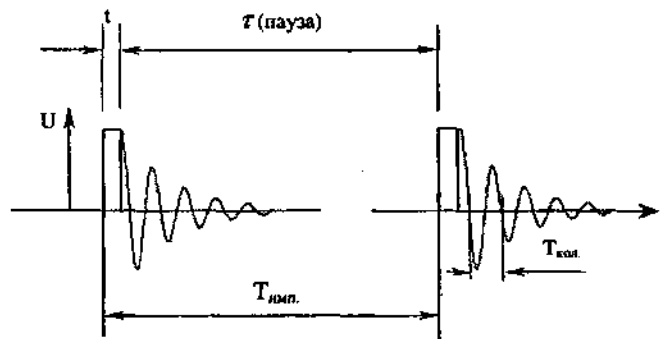


Рис. 16.1

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

Натуральный логарифм такого отношения позволяет вычислить коэффициент затухания β : $\beta = \frac{1}{T} \cdot \ln\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$. Поскольку отношение амплитуд есть безразмерный параметр, то сами амплитуды могут измеряться в любых (но одинаковых) единицах. Это могут быть вольты, миллиамперы,

сантиметры и т. п. Собирая схемы с разными сопротивлениями контура и измеряя (в миллиметрах) амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе, различающиеся на период, можно для каждого сопротивления вычислить коэффициент затухания. Как следует из формулы $\beta = \frac{R}{2L}$, коэффициент затухания линейно растёт с ростом сопротивления контура (см. рис. 6).

Поскольку «внутреннее» r_0 сопротивление катушки индуктивности и проводов неизвестно, то можно вычислить коэффициенты затухания $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ для схем, когда дополнительное сопротивление контура равно нулю $R_0=0$ или имеет заранее известные значения R_1 и R_2 (эталонные). Полученные данные позволяют построить линейный график $\beta=f(R_{доп})$ (см. рис. 6). Если интерполировать график до пересечения с осью абсцисс, то по точке пересечения графика с осью можно определить величину минимального внутреннего сопротивления контура.

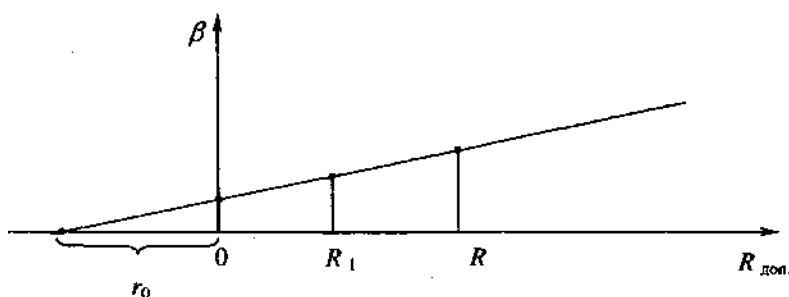


Рис. 16.2

Далее, используя формулу $\beta = \frac{r_0}{2L}$ в виде $L = \frac{R}{2\beta}$, можно вычислить

индуктивность L катушки.

Собрав электрическую схему согласно рисунка 7. Измерив частоту следования коротких импульсов генератора и оценив с избранной надёжностью погрешность этого измерения, измеряем по экрану длину одного цикла колебаний (это период импульсов в миллиметрах, см. рис. 5) и вычисляем масштаб развертки, приравнивая их, например: $T_{имп} = \frac{1}{2000}(с) = 0,0005(с)$ $T_{имп} = 50 \text{ мм} \Rightarrow 50 \text{ мм} = 0,0005(с)$, $1 \text{ мм} = 0,0001(с)$.

Осциллограф С1-117



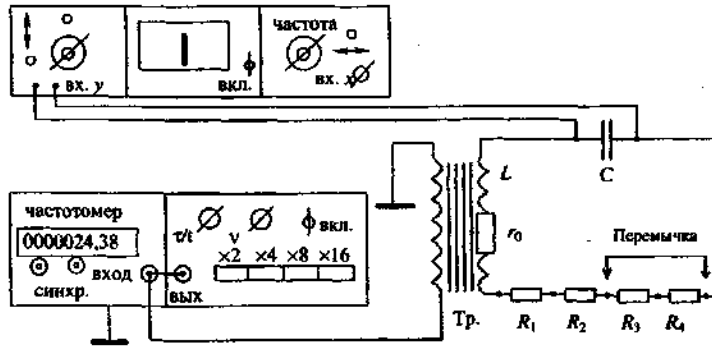


Рис. 16.3. Схема подключения приборов к колебательному контуру

↑ Генератор ГЗ-131 ↑ Трансформатор

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

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

Строим линейный график зависимости $\beta=f(R_{дон})$ и по результатам интерполирования определить значение r_0 (см. рис. 6).

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

Измерение напряжений. Если осциллограф не имеет специального устройства для измерения напряжений, то по длине линии l и известному значению S_0 можно определить напряжение:

$$U = \frac{l}{S_{0,действ}}; \quad 2U_m = \frac{l}{S_{0,пик}}; \quad U_{пик} = \frac{l}{S_{0,пик}},$$

где $2U_m$ —размах (двойная амплитуда) периодического напряжения;

$S_{0,действ}$ — чувствительность по каналу X или Y ;

$U_{пик}$ —пиковая амплитуда односторонних импульсов.

Если известно сопротивление R , с которого снимается измеряемое напряжение, то по закону Ома может быть найдено и соответствующее значение тока в исследуемой цепи. При включённой развёртке осциллограф позволяет измерить напряжение или ток в отдельных точках наблюдаемой на экране кривой.

Измерение низких частот производят по блок-схеме. Напряжение измеряемой частоты F_x и известной частоты $F_0=F_y$ образцового генератора подводят к различным входам осциллографа. Частоту F_y изменяют до тех пор, пока на экране не возникнет неподвижная фигура, называемая фигурой Лиссажу (желательно возможно более простой формы, например в виде окружности или восьмёрки). Эту фигуру мысленно пересекают линиями x_1x_2 и y_1y_2 , и подсчитывают

число пересечений каждой из линий с фигурой. Отношение полученных чисел $m:n$ точно равно отношению частот $F_x:F_y$ при условии, что проведённые линии не проходят через узловые точки фигуры или касательно к ней, а форма сравниваемых колебаний близка к синусоидальной.

Измеряемая частота $F_x = F_y \frac{m}{n}$.

Измерение сдвига фаз φ . Для этого исследуемые напряжения U_x и U_y одинаковой частоты подводятся одновременно к соответствующим пластинам электроннолучевой трубки. На экране наблюдается эллипс, который при $\varphi=0$ и $\varphi=180^\circ$ сжимается в прямую линию. Сдвиг фаз находится по размерам отрезков, отсекаемых эллипсом на осях координат в соответствии с формулой $\varphi = \pm \arcsin \frac{b}{B} = \pm \arcsin \frac{a}{A}$. Погрешность измерений порядка 5% при φ , близком к 0 и 180° , и сильно возрастает вблизи 90 и 270° . При подаче исследуемых напряжений через усилители каналов возникает дополнительная погрешность за счёт разности фазовых сдвигов при усилении.

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