

МИНИСТЕРСТВО  
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

---

Ю. В. ТРОНИН

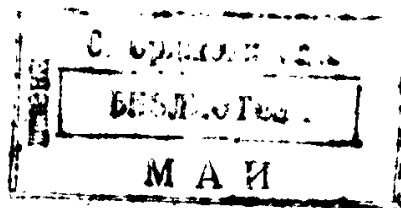
# ОСЦИЛЛОГРАФ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по курсу

„ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ  
ИЗМЕРЕНИЯ“

*Утверждено*  
на заседании редсовета  
28 октября 1975 г.



МОСКВА — 1977

УДК: 621.317.755 (075.8)

Пособие представляет собой раздел курса «Электрические и радиотехнические измерения» и курса «Измерительная техника». Оно может быть также использовано при самостоятельной подготовке к выполнению лабораторных работ.

Пособие предназначено для студентов дневного и вечернего отделений, причем студенты вечернего отделения, имеющие практику работы с осциллографом, могут опустить раздел «Работа с осциллографом».

---

© Московский авиационный институт, 1977 г.

Зав. редакцией *М. И. Кузнецова*

621.317 (075)  
Т 732

## ВВЕДЕНИЕ

Осциллографом называют прибор, предназначенный для наблюдения формы электрических колебаний и измерения их параметров. В электронном осциллографе индикатором служит электроннолучевая трубка. Остро сфокусированный поток электронов — луч служит как бы карандашом, рисующим на экране ту или иную картину — осциллограмму в соответствии с формой напряжений, подаваемых на отклоняющие пластины трубки.

Скорость движения светящегося пятна по экрану может достигать космических величин — нескольких тысяч километров в секунду. Это позволяет регистрировать весьма быстрые процессы. Широко распространены осциллографы, рассчитанные на сигналы длительностью в доли микросекунды. Специальные скоростные осциллографы работают в диапазоне наносекундных длительностей.

Применение осциллографов чрезвычайно широко. Нельзя, пожалуй, указать ни одного из направлений радиоэлектроники, где экспериментаторы обходились бы без осциллографа. Потребители предъявляют к осциллографам разнообразные требования, часто противоречивые (а в ряде случаев очень специфические). На основе анализа требований к техническим характеристикам осциллографов в настоящее время выделены следующие основные группы\*.

1. Осциллографы универсальные. Наряду с высокими основными техническими характеристиками (полосой пропускания, чувствительностью, погрешностями измерения амплитуд и длительностей), особое значение имеет компактность прибора, его надежность, сравнительная простота управления.

В группе универсальных осциллографов имеется подгруппа многофункциональных приборов со сменными блоками, обеспечивающими различные характеристики канала вертикального отклонения: либо повышенная чувствительность, либо расширенная полоса пропускания, либо дифференциальный вход, позволяющий

---

\* Марка осциллографа состоит из буквы С, цифры, указывающей на принадлежность к той или иной группе, а после черточки — порядкового номера разработки прибора.

наблюдать разность двух сигналов, либо двухканальный вход с электронным коммутатором, позволяющий наблюдать на экране одновременно два сигнала, и ряд других.

2. Скоростные и стробоскопические осциллографы (обозначение группы С7-...). Эти осциллографы предназначены для наблюдения сверхбыстрых процессов в наносекундном диапазоне длительностей. Они отличаются чрезвычайно широкой эффективной полосой пропускания (сотни мегагерц — единицы гигагерц).

3. Осциллографы запоминающие. В осциллографах этой группы используются электроннолучевые трубки с запоминанием и воспроизведением изображения. Основное назначение — наблюдение однократных или редко повторяющихся импульсных сигналов.

4. Осциллографы специальные. К этой группе относят осциллографы, позволяющие решать специфические задачи (например, осциллографы, специально предназначенные для отладки телевизионной аппаратуры).

В данном пособии рассматриваются осциллографы универсальные.

Современный универсальный осциллограф — сложный прибор, состоящий из многих узлов. Характеристики узлов, а также связь между узлами можно изменять. Это дает богатый выбор возможностей при постановке эксперимента, однако имеет и обратную сторону: большое число органов управления и регулировок затрудняет на первых порах работу с осциллографом. Поэтому необходимо ясное понимание принципов работы осциллографа в целом, назначение его отдельных узлов и особенно их взаимодействия.

## ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ТРУБКА (ЭЛТ)

В электронных осциллографах, как правило, используются ЭЛТ с электростатическим отклонением и фокусировкой. Схематически такая трубка показана на рис. 1.

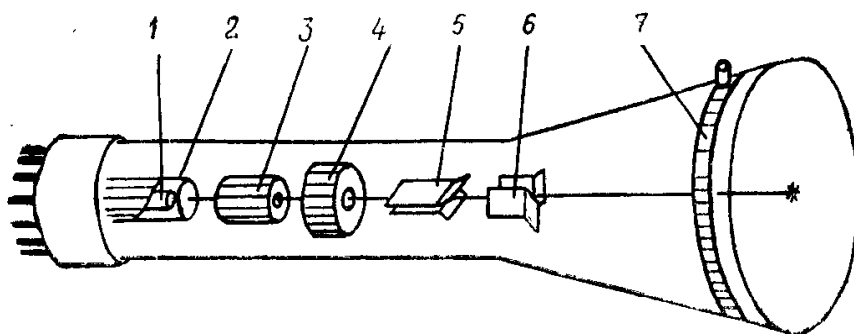


Рис. 1. Электроннолучевая трубка:  
1 — катод; 2 — управляющий электрод (модулятор); 3 — первый анод; 4 — второй анод; 5 — вертикально отклоненные пластины; 6 — горизонтально отклоненные пластины; 7 — послеускоряющий электрод.

Можно выделить две группы электродов: первая служит для создания электронного луча, вторая — для управления движением луча по экрану.

Первую группу электродов, включающую в себя подогревный катод 1, управляющий электрод, или модулятор 2, первый анод 3 и второй анод 4, принято называть электронным прожектором (или электронной пушкой). Электронный прожектор создает пучок электронов, быстро летящих к экрану ЭЛТ и вызывающих свечение в точке, где электроны ударяются о флуоресцирующий слой (люминофор), нанесенный на внутреннюю поверхность экрана.

Ускоряющее продольное поле разгоняет электроны, эмиттируемые с торца катода. Скорость, с которой электроны вылетают из электронной пушки, определяется разностью потенциалов между катодом и последним ускоряющим электродом — вторым анодом. Потенциал первого анода не играет роли, так как он определяет лишь промежуточное значение скорости. После вылета из электронной пушки электроны летят далее по инерции с постоянной скоростью.

Яркость свечения точки на экране зависит от плотности электронов в пучке и кинетической энергии электрона, т. е. его скорости. Характер зависимости хорошо аппроксимируется выражением

$$B = Aj(U_{\text{уск}} - U_0)^n, \quad (1)$$

где  $B$  — яркость;

$j$  — плотность электронов в пучке;

$U_{\text{уск}}$  — ускоряющее напряжение;

$U_0$  — пороговое значение  $U_{\text{уск}}$ , при котором начинается возбуждение люминофора;

$A, n$  — константы, характеризующие люминофор.

Из формулы (1) видно, что регулировать яркость можно либо изменением плотности пучка, либо изменением ускоряющего напряжения. Более удобно осуществлять регулировку плотности пучка. Этой цели служит специальный электрод — модулятор, играющий ту же роль, что и управляющая сетка в электронной лампе. Изменением отрицательного «смещения» (разности потенциалов между модулятором и катодом ЭЛТ) можно регулировать ток луча от полного запираения до максимального значения. Напряжение отсечки в ЭЛТ составляет несколько десятков вольт (от — 20 до — 60В).

Фокусировка луча обеспечивается двумя факторами. Предварительное формирование узкого луча осуществляется диафрагмированием: аноды пушки имеют в торцах малые отверстия, пропускающие только те электроны, которые летят близко к оси. Окончательная фокусировка достигается двумя электростатическими линзами: первая образуется в пространстве между модулятором и первым анодом, вторая — между первым и вторым анодом. Под действием этих линз электронный луч приобретает форму веретена.

Желательно, чтобы точка наибольшего сужения (острие веретена) совпадала с плоскостью экрана. Кривизна линз, а значит, и фокусное расстояние зависят от разности потенциалов всех электродов, образующих линзы. Наиболее удобно регулировать фокус изменением потенциала первого анода.

Для отклонения луча используются две пары пластин (рис. 1): вертикально отклоняющие  $b$   $Y_1$  и  $Y_2$  и горизонтально отклоняющие  $b$   $X_1$  и  $X_2$ . Отклонение луча по вертикали  $Y$  и горизонтали  $X$  пропорционально соответствующим напряжениям:

$$Y = S_Y U_Y; \quad X = S_X U_X, \quad (2)$$

где  $U_Y$  — разность потенциалов пластин  $Y_1$  и  $Y_2$ ;

$U_X$  — разность потенциалов пластин  $X_1$  и  $X_2$ .

Коэффициенты пропорциональности  $S_Y$  и  $S_X$  называются чувствительностью трубки по  $Y$  и  $X$  пластинам. Чувствительность трубки при плоскопараллельной конструкции пластин определяется формулой.

$$S = \frac{lL}{2dU_{\text{уск}}} \quad (3)$$

где  $l$  — длина отклоняющих пластин;

$d$  — расстояние между ними;

$L$  — расстояние от пластин до экрана;

$U_{\text{уск}}$  — ускоряющее напряжение.

Физически структура формулы (3) вполне понятна: чем больше длина пластин  $l$  и чем меньше продольная скорость электронов (чем меньше  $U_{\text{уск}}$ ), тем дольше воздействует отклоняющее поле на электрон, тем больше угловое отклонение луча. Чем больше  $L$ , тем больше линейное перемещение  $Y$  при том же угловом отклонении.

Отклоняющее напряжение может подводиться к пластинам по схемам одноктактной (несимметричной) или двухтактной (симметричной) подачи. В первом варианте фиксируется потенциал одной пластины, а на другую подается сигнал  $U$ , во втором — на одну из пластин подается  $+\frac{U}{2}$ , а на другую  $-\frac{U}{2}$ . С точки зрения вели-

чины отклонения оба варианта равноценны, однако качество изображения при двухтактной подаче выше. Дело в следующем.

Оптimum фокусировки зависит от скорости, с которой электроны летят к экрану. Допустим, при данной скорости подобран оптимальный режим фокусировки, т. е. плоскость наибольшего сужения луча совмещена с экраном. Если на одну из пластин подать положительное отклоняющее напряжение  $+U_Y$ , то кроме отклонения вверх электроны получат и дополнительное продольное ускорение. Точка фокусировки оказывается дальше плоскости экрана. Аналогично при подаче  $-U_Y$  луч отклоняется вниз, но одновременно продольная скорость уменьшается, и точка фокусировки оказыва-

ется ближе экрана. Короче говоря, луч, сфокусированный в центре экрана, оказывается расфокусированным на периферии.

Если же применяется двухтактное отклонение, то средний потенциал обеих пластин остается неизменным, следовательно, в пространстве между вторым анодом и отклоняющими пластинами не появляется дополнительного ускоряющего или замедляющего поля, и условия фокусировки сохраняются.

Чувствительность — важнейший параметр ЭЛТ с точки зрения применения ее в осциллографе. Порядок чувствительности типовых трубок в осциллографах, построенных на электронных лампах, составлял десятые доли миллиметра на 1В (0,1—0,4 мм/В). Следовательно, для отклонения луча на несколько сантиметров необходимо напряжение более 100 В. При использовании усилителей на электронных лампах, работающих при напряжениях 200—300В, это не вызывало особых трудностей. Однако с переходом на полупроводниковые приборы, рассчитанные на напряжение питания 10—20 В, вопрос проектирования оконченных каскадов усилителей, подающих сигналы на отклоняющие пластины, встал довольно остро.

На помощь пришли разработчики новых электроннолучевых трубок, существенно улучшившие технические характеристики ЭЛТ.

Улучшение качества трубок идет по нескольким направлениям. Первый путь прямой: повышение чувствительности. В ЭЛТ последних образцов чувствительность составляет 1—1,5 мм/В, имеются трубки с повышенной чувствительностью до 4,5—5 мм/В.

Второй путь косвенный, основанный на том, что размер изображения сам по себе не играет существенной роли. Качество изображения и точность измерений по осциллограмме зависят от соотношения размера изображения и толщины линии. Отсюда следует, что уменьшение диаметра пятна светового луча на экране эквивалентно увеличению чувствительности: можно работать при меньшем абсолютном размере изображения. Для уменьшения диаметра пятна необходимо не только улучшить фокусировку, но и принять меры борьбы с астигматизмом и другими аберрациями. В современных ЭЛТ диаметр пятна составляет около 0,5 мм (вместо 1,2—1,5 мм у трубок старых образцов). Кроме того, принимаются меры к уменьшению погрешностей снятия размеров с экрана: используется плоский экран ЭЛТ с нанесенными на стекло рисками, что исключает ошибки параллакса.

Повышенные характеристики ЭЛТ получены использованием более рациональной конструкции электродов, их геометрии, введением дополнительных электродов. Так, помимо 1-го и 2-го анодов введены 3-й и 4-й, обеспечивающие «послеускорение», введены также специальный электрод для коррекции астигматизма и экранировка пластин.

Идея «послеускорения» состоит в следующем. Если снизить скорость электронов, пролетающих в пространстве отклоняющих пластин, то чувствительность повысится (см. формулу (3)). Однако

при этом падает яркость (см. формулу (1)). Увеличить яркость можно, ускоряя электроны после отклонения луча. Для этого на колбу трубки вблизи экрана наносят проводящие кольца (аквадагровое покрытие) и подают на них высокое положительное напряжение порядка 1—2 кВ. На рис. 1 показан послеускоряющий электрод 7.

## ОСЦИЛЛОГРАММА

Исследуемый сигнал  $U(t)$  подается на вертикально отклоняющие пластины трубки. На горизонтально отклоняющие пластины подают вспомогательный сигнал — напряжение, линейно нарастающее во времени и называемое напряжением развертки или просто разверткой. Под действием напряжения развертки луч перемещается слева направо с постоянной скоростью. Если на  $Y$  пластины сигнал не подан, а развертка включена, то луч прочеркивает на экране горизонтальную линию — линию развертки. При одновременной подаче развертки и сигнала траектория движения луча повторяет по форме исследуемый сигнал. Однако за один пробег по экрану, длящийся очень короткое время, глаз человека не успевает отреагировать. Для получения видимого изображения необходимо многократное наложение друг на друга отдельных пробегов луча по экрану.

При наблюдении периодических сигналов чаще всего применяется периодическая развертка. Напряжение  $U_x(t)$  линейно нарастает в течение некоторого времени (прямой ход), а затем резко обрывается (обратный ход), и это повторяется периодически. В целом это напоминает зубья пилы. Такую развертку называют пилообразной. При каждом прямом ходе луч описывает траекторию, соответствующую исследуемому сигналу. Если частота повторения не слишком мала (выше 20 Гц), глаз человека усредняет пробеги, и наблюдаемая картина — осциллограмма кажется неподвижным графиком, нарисованным на экране.

Правильная осциллограмма не получается сама собой. Если не обеспечить нужный режим развертки, то картина, наблюдаемая на экране, может оказаться совершенно непонятной, совсем не похожей на исследуемый сигнал.

Во-первых, необходим правильный выбор масштаба скорости развертки. При слишком медленной развертке за время одного прямого хода проходит большое число периодов сигнала. Изображение оказывается очень сжатым. При слишком быстрой развертке — излишне растянутым. Желательно выбирать такую скорость развертки, чтобы на прямом ходе укладывалось небольшое число периодов (2—3) исследуемого сигнала.

Однако это только первый шаг. Дело в том, что и при правильно выбранном масштабе развертки осциллограмма может «не получиться». Рассмотрим пример. Пусть исследуемый сигнал — си-



нусаидальное напряжение некоторой частоты  $f_c$ , изображенное на рис. 2, а, а развертка — пилообразное напряжение частоты  $f_p$  (рис. 2, б). Периоды сигнала и развертки не очень сильно отличаются, так что масштаб развертки выбран правильно. Проследим за траекторией движения луча в случае развертки, показанной на рис. 2, б, начиная с некоторого момента времени  $0$ . В течение первого хода развертки луч движется по траектории, соответствующей участку сигнала  $0-1$ . В момент времени  $1$  луч скачком возвращается справа налево, но оказывается в новой (по вертикали) исходной точке. На втором ходе развертки луч движется по ли-

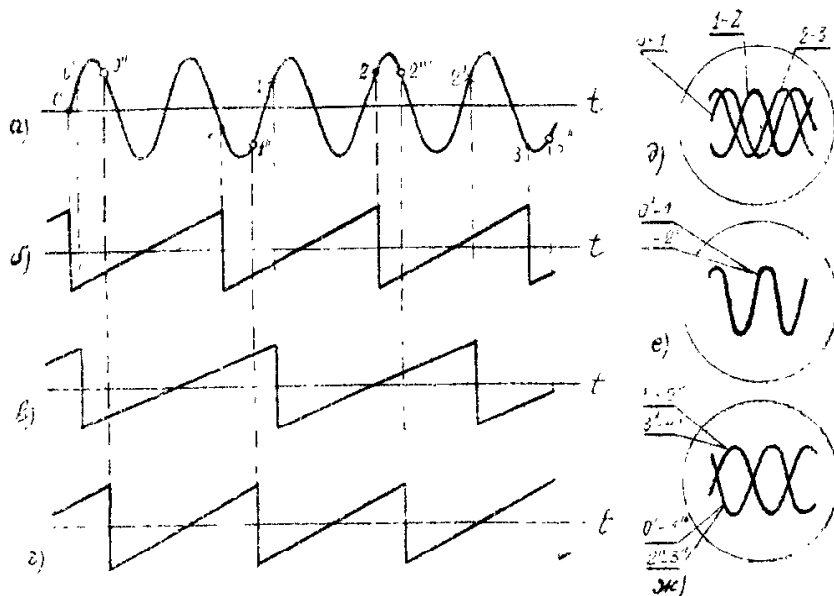


Рис. 2. Формирование изображения при разных соотношениях частот сигнала и разверток:  
 а — сигнал; б, в, г — пилообразные развертки; д, е, ж — осциллограммы

нии  $1-2$ , не совпадающей с линией  $0-1$  (рис. 2, д). И так при каждом ходе на экране рисуется новая картина. Глаз не успевает уследить за каждым проходом в отдельности, и создается впечатление, подобное восприятию мультфильма: если «кадр» от «кадра» отличается мало, мы видим плавное движение — «бегущую» синусоиду, если же отличие велико, создается впечатление «скачущего» хаотичного изображения.

Для того чтобы осциллограмма была неподвижной, необходимо совпадение начала каждого прямого хода развертки всегда с одинаковой точкой сигнала (рис. 2, в). Тогда отдельные пробеги луча дают совпадающие изображения (рис. 2, е). Очевидно, что для периодических сигнала и развертки условие «привязки» начала развертки сводится к условию кратности периодов

$$T_p = NT_c \quad (4)$$

или кратности частот

$$f_p = \frac{f_c}{N}, \quad (5)$$

где  $N$  — любое целое число.

Рассмотрим еще один интересный и важный случай. Пусть периоды сигнала и развертки находятся в дробно-кратном отношении. Такой случай показан на рис. 2, з, где  $T_c/T_p = 2/3$ . Нетрудно видеть, что траектории движения луча на участках 0—1 и 1—2 разные, третий же ход луча (2—3) совпадает с ходом 0—1, а четвертый — с ходом 1—2 и т. д. Суммарный видимый эффект (рис. 2, ж) — наложение двух картинок, «одновременно» присутствующих на экране. Следует подчеркнуть, что режим дробно-кратного соотношения периодов подчас трудно отличить от правильного режима кратного соотношения, что может привести к неправильной расшифровке осциллограммы.

В качестве такого примера рассмотрим рис. 3. Исследуемый сигнал представляет собой пачки импульсов (рис. 3, а). Период

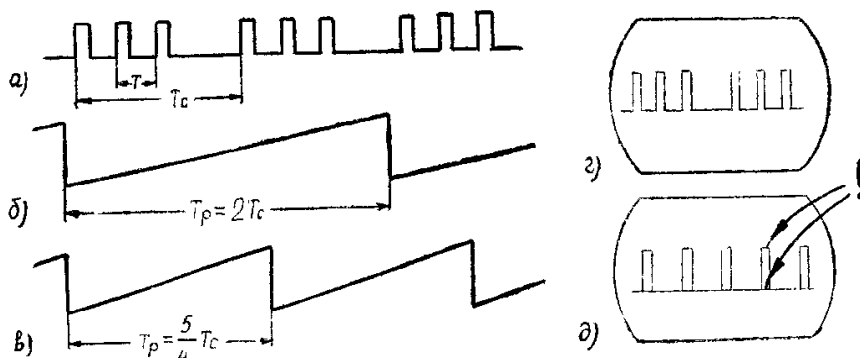


Рис. 3. Правильный (б, г) и неправильный (в, а) выбор частоты развертки

сигнала есть  $T_c$ , а не расстояние между импульсами  $T$ . Правильно выбранный период развертки (рис. 3, б) дает осциллограмму (рис. 3, г), соответствующую истинной форме сигнала. Если же период развертки такой, как на рис. 3, в, то осциллограмма (рис. 3, д) не показывает пауз между пачками. Для того чтобы обнаружить ошибку, полезно пользоваться следующим правилом: при движении луч не может одновременно находиться в двух точках экрана. Значит, в осциллограмме не должно быть двойных линий (если обратный ход затемнен). Из этого правила следует, что осциллограмма (рис. 3, д) является наложением нескольких, по крайней мере двух, несовпадающих картинок, так как луч не может одновременно рисовать и верхушку импульса, и линию, идущую по основанию. В правильной осциллограмме импульс должен «разрывать» нулевую линию, как это есть в осциллограмме рис. 3, г.

Итак, при наблюдении периодического сигнала с помощью пилообразной развертки правильная осциллограмма наблюдается только тогда, когда частоты сигнала и развертки строго кратны.

Поскольку сигнал может иметь произвольную частоту в некотором диапазоне, то частоту развертки нужно подстраивать под частоту сигнала.

Напряжение развертки вырабатывается специальным генератором развертки, который является одним из основных узлов осциллографа. Изменяя параметры генератора, можно регулировать частоту развертки (а значит, и ее скорость) в широких пределах.

Следует однако сразу же сказать, что эта регулировка позволяет лишь приблизиться к условию кратности, т. е. выбрать желаемый масштаб. Добиться точного равенства или кратности частот подбором частоты развертки практически невозможно. Это связано с естественной нестабильностью как частоты развертки, так и частоты исследуемого сигнала. «Остановить» осциллограмму, регулируя частоту развертки, почти никогда не удается.

Задача решается применением синхронизации развертки — принудительным навязыванием генератору развертки периода, кратного периоду сигнала, путем воздействия на генератор самим сигналом. Методы синхронизации довольно разнообразны. Один из них рассмотрим при анализе практической схемы генератора развертки.

Помимо периодической пилообразной развертки во всех современных осциллографах предусмотрен режим ждущей развертки, значительно более удобный при наблюдении коротких импульсных сигналов (рис. 4, а). В этом режиме генератор развертки заторможен, т. е. не вырабатывает напряжения до тех пор, пока на него не будет подан специальный импульс запуска (рис. 4, б). Луч на

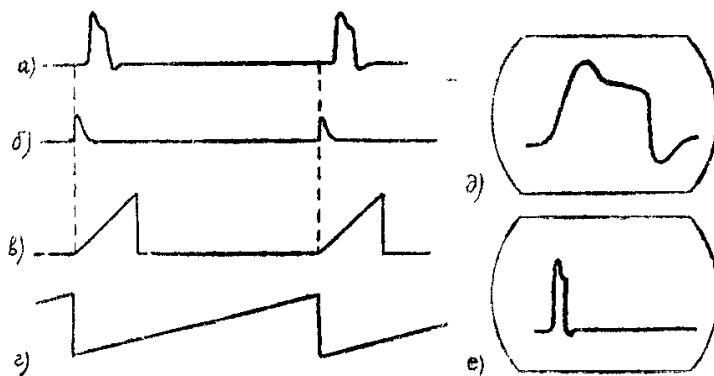


Рис. 4. Ждущая развертка:  
*а* — сигнал; *б* — импульс запуска; *в* — ждущая  
 развертка; *г* — пилообразная развертка; *д, е* — осциллограмма

экране отклонен в исходное (крайнее левое) положение. При подаче запускающего импульса генератор вырабатывает один треугольный импульс (рис. 4, в), вызывающий пробег луча по экрану слева направо (прямой ход) и возврат в исходное положение (обратный ход). Скорость, а следовательно, и длительность развертки

выбираются регулировкой параметров генератора развертки и не зависят от периода повторения.

Это важно для наблюдения импульсных сигналов, когда длительность самого импульса существенно меньше периода повторения. При использовании пилообразной развертки мы вынуждены выбирать скорость развертки так, чтобы получить равенство периодов  $T_p = T_c$ ; при этом изображение импульса на экране оказывается очень сжатым (рис. 4, e). В режиме ждущей развертки можно выбирать скорость развертки, исходя из длительности импульса, а не периода. На экране при этом разворачивается в крупном масштабе интересующий нас участок оси времени (рис. 4, d).

Правильная, устойчивая осциллограмма получается тогда, когда начало каждой развертки одинаково опережает каждый из последовательности наблюдаемых импульсов. Для этого необходима жесткая временная связь между импульсом запуска и исследуемым сигналом. Стоит отметить, что осциллограмма может быть устойчивой и при наблюдении непериодической последовательности одинаковых импульсов, чего нельзя добиться в режиме периодической развертки.

При работе со ждущей разверткой очень важно правильно выбрать импульс запуска. Как получить импульс, предвещающий неизвестный момент появления исследуемого сигнала? Наиболее простым и распространенным методом решения этой задачи является использование самого исследуемого импульса. Исследуемый сигнал не сразу подводится к Y-пластинкам трубки. В тракт прохождения сигнала включается линия задержки, не искажающая форму сигнала, но вносящая запаздывание (рис. 5). Входной сигнал

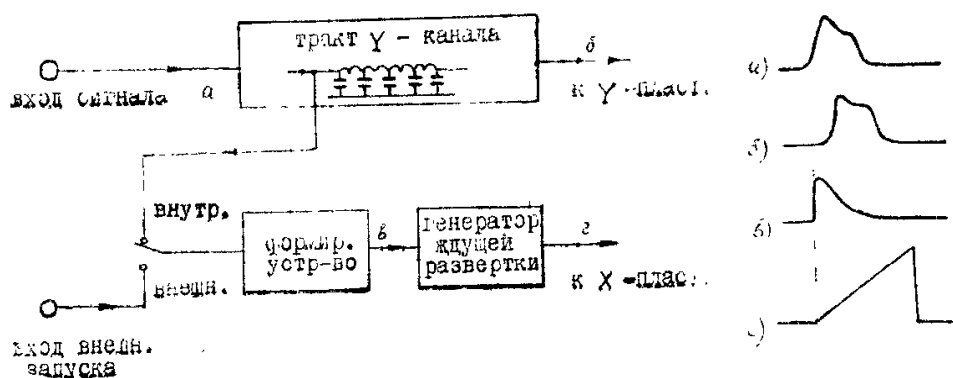


Рис. 5. Блок-схема запуска генератора ждущей развертки:  
а, б, в, г — формы напряжений в соответствующих точках блок-схемы

оказывается опережающим по отношению к сигналу, приложенному к пластинкам трубки. Этот опережающий сигнал после некоторого формирования используется для запуска генератора ждущей развертки. Поскольку отвлечение сигнала для запуска производится внутри самой схемы осциллографа, такой режим называется внутренним запуском.

Наряду с внутренним запуском широко применяется и внешний запуск ждущей развертки. При работе с импульсной аппаратурой экспериментатор практически всегда, зная структуру своей схемы, может найти ту точку, где имеется сигнал, опережающий исследуемый. Этот опережающий сигнал можно подать на специальный вход осциллографа («Внешний запуск»).

В современных универсальных осциллографах часто используется еще один режим запуска ждущей развертки — развертка с задержкой. В этом случае импульс запуска не подается непосредственно на генератор ждущей развертки, а запускает вспомогательную импульсную схему задержки. Схема вырабатывает некоторый импульс стандартной формы, например прямоугольной, передний фронт которого совпадает с импульсом запуска, а длительность определяется параметрами самой схемы задержки (рис. 6). После

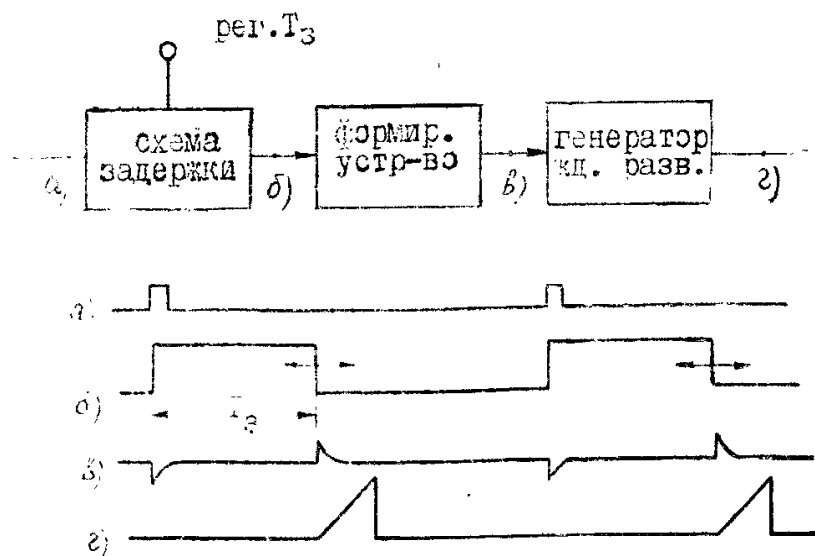


Рис. 6. Ждущая развертка с задержкой

преобразования, например дифференцирования, можно получить импульс, задержанный на регулируемое время  $T_z$ . Этот импульс и запускает ждущую развертку. Пример использования такого режима иллюстрируется рис. 7. Пусть исследуемый сигнал — перио-

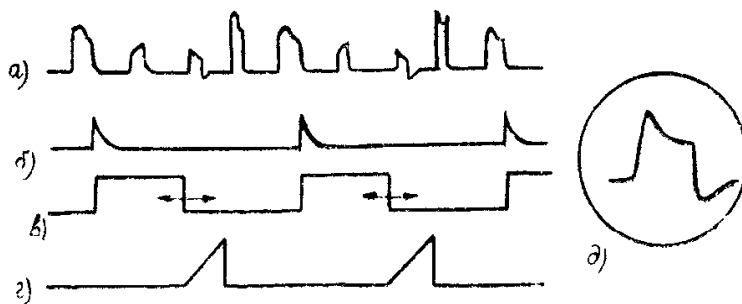


Рис. 7. Пример применения ждущей развертки с задержкой:

а — исследуемые сигналы; б — импульс запуска, в — напряжение, вырабатываемое в схеме задержки; г — ждущая развертка; д — осциллограмма

дическая последовательность импульсов достаточно сложной формы (рис. 7, а). Кроме того, в нашем распоряжении имеется более простой сигнал с той же периодичностью (рис. 7, б), который удобно взять в качестве запускающего. Применяя режим развертки с задержкой, можно совместить развертку с любым из участков исследуемого сигнала.

Все рассмотренные режимы имели целью получение на осциллограмме изображения формы сигнала во времени  $U(t)$ . Нередко ставится другая задача: исследовать зависимость между двумя переменными. Имея в виду возможность преобразования любых неэлектрических величин в электрические, задача сводится к наблюдению зависимости между двумя напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ :

$$U_1 = F(U_2). \quad (6)$$

Оба напряжения представляют собой некоторые процессы во времени  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , но переменная «время» не представляет для нас интереса.

Если подать один из сигналов на вертикально-отклоняющие пластины, а другой на горизонтально-отклоняющие, то траектория движения луча по экрану задается параметрически

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= S_Y U_1(t), \\ X(t) &= S_X U_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и представляет собой искомую зависимость в некотором масштабе:

$$\frac{Y}{S_Y} = F\left(\frac{X}{S_X}\right). \quad (8)$$

Важно отметить, что вид осциллограммы не зависит от того, каковы функции времени, так как параметр «время» в уравнении траектории (8) не фигурирует. В качестве примера рассмотрим задачу наблюдения на экране ЭЛТ коллекторной характеристики транзистора. Упрощенная схема установки показана на рис. 8.

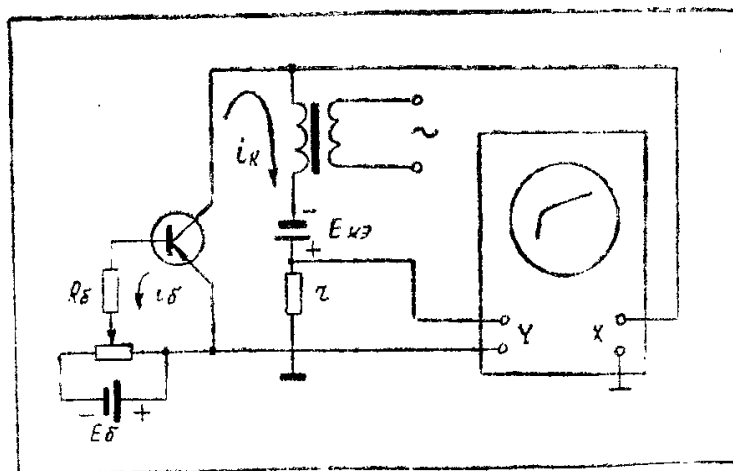


Рис. 8. Упрощенная схема установки для наблюдения коллекторных характеристик транзистора

Напряжение на коллекторе задается источником  $E_{кэ}$  и переменным напряжением на вторичной обмотке трансформатора. Это напряжение подается на вход  $X$  осциллографа. На вход  $Y$  подается напряжение, снимаемое с резистора  $r$ , включенного в цепь коллекторного тока. Сопротивление резистора выбирается малым, чтобы оно не влияло на режим коллекторной цепи. На экране осциллографа появляется изображение кривой  $i_k = f(u_k)$  при параметре  $i_6 = \text{const}$ . Для обеспечения постоянства тока базы питание ее должно осуществляться от «генератора тока», для чего следует правильно выбрать параметры  $E_6$  и  $R_6$ . При некотором усложнении схемы можно получить на экране все семейство кривых  $i_k = f(u_k, i_6)$ .

Очень часто осциллограф используют для наблюдения так называемых фигур Лиссажу, с помощью которых удобно измерять сдвиг фаз между двумя синусоидами. Напряжения подаются на  $Y$ - и  $X$ -пластины ЭЛТ:

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= A \sin \omega t, \\ Y(t) &= B \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Как известно, уравнения (9) суть параметрическая запись эллипса. Изображение на экране (рис. 9, а) позволяет определить угол  $\varphi$  по снятым с экрана размерам  $2Y_0$  и  $2Y_m$ :

$$\sin \varphi = \frac{2Y_0}{2Y_m}. \quad (10)$$

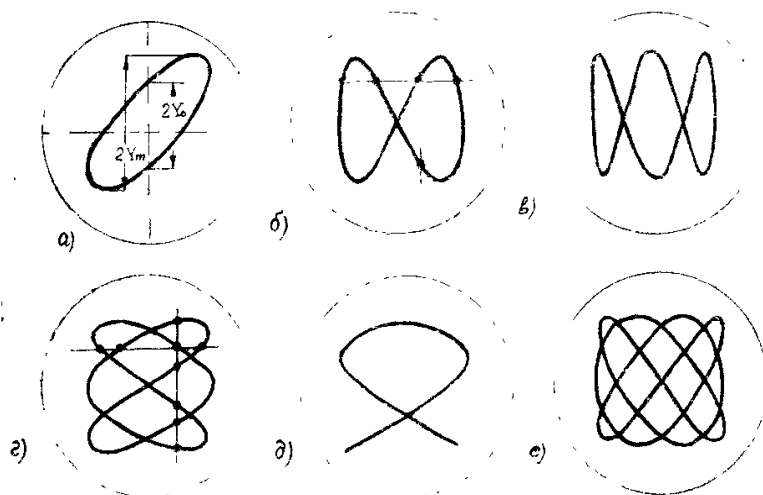


Рис. 9. Фигуры Лиссажу:

$$\begin{aligned} \text{a) } f_Y/f_X &= 1; \text{ б) } f_Y/f_X = 2; \text{ в) } f_Y/f_X = 3; \text{ г) } f_Y/f_X = \\ &= 2/3; \text{ д) } f_Y/f_X = 2/3; \text{ е) } f_Y/f_X = 4/3 \end{aligned}$$

Если сигналы  $U_X(t)$  и  $U_Y(t)$  представляют собой гармонические колебания, частоты которых находятся в кратном или дробно-кратном соотношении, то соответствующие осциллограммы — более сложные фигуры Лиссажу (рис. 9, б — е). По их виду можно определить отношение частот и разность фаз. Отношение частот нахо-

дится подсчетом числа точек\* пересечения фигуры Лиссажу с вертикалью  $n_Y$  и горизонталью  $n_X$ :

$$\frac{f_Y}{f_X} = \frac{n_X}{n_Y} \quad (11)$$

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА

В функциональной схеме осциллографа (рис. 10) можно выделить четыре основных блока узлов:

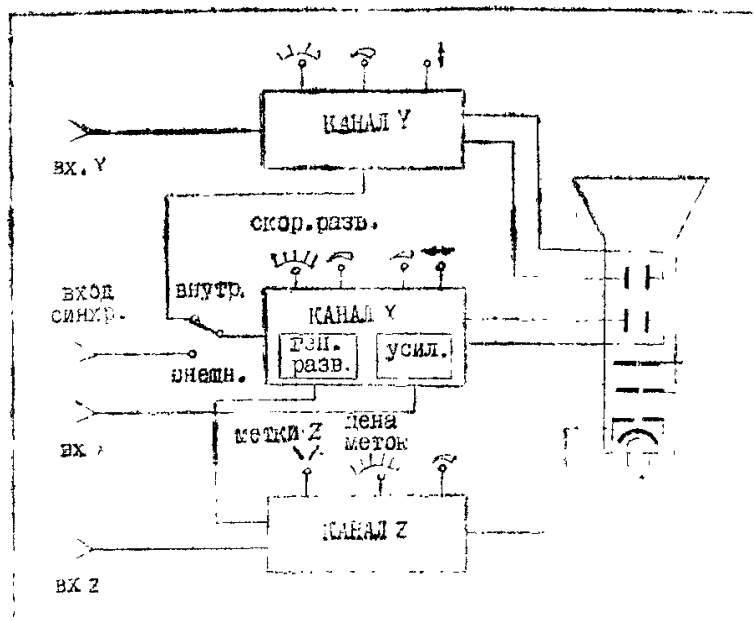


Рис. 10. Увеличенная функциональная схема осциллографа

1. Электроннолучевая трубка с цепями управления ее режимом.
2. Блок вертикального отклонения (канал Y).
3. Блок горизонтального отклонения (канал X).
4. Блок формирования сигналов, управляющих яркостью луча (канал Z).

Развернутая функциональная схема осциллографа дана на рис. 11.

### Блок вертикального отклонения

Исследуемый сигнал подводится к клемме «Вход Y» и поступает с нее на входной делитель с дискретным переключением ослабления, например, 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100, 1 : 1000. Входной делитель нужен для того, чтобы дать возможность последующим каскадам работать примерно с одинаковыми сигналами, независимо от величины входных сигналов. Далее следует усилитель канала Y, состоящий из

\* Проводя сечения фигуры Лиссажу, нужно следить, чтобы полученные точки не были узловыми, т. е. не принадлежали одновременно нескольким ветвям, в противном случае нужно учитывать кратность узла.



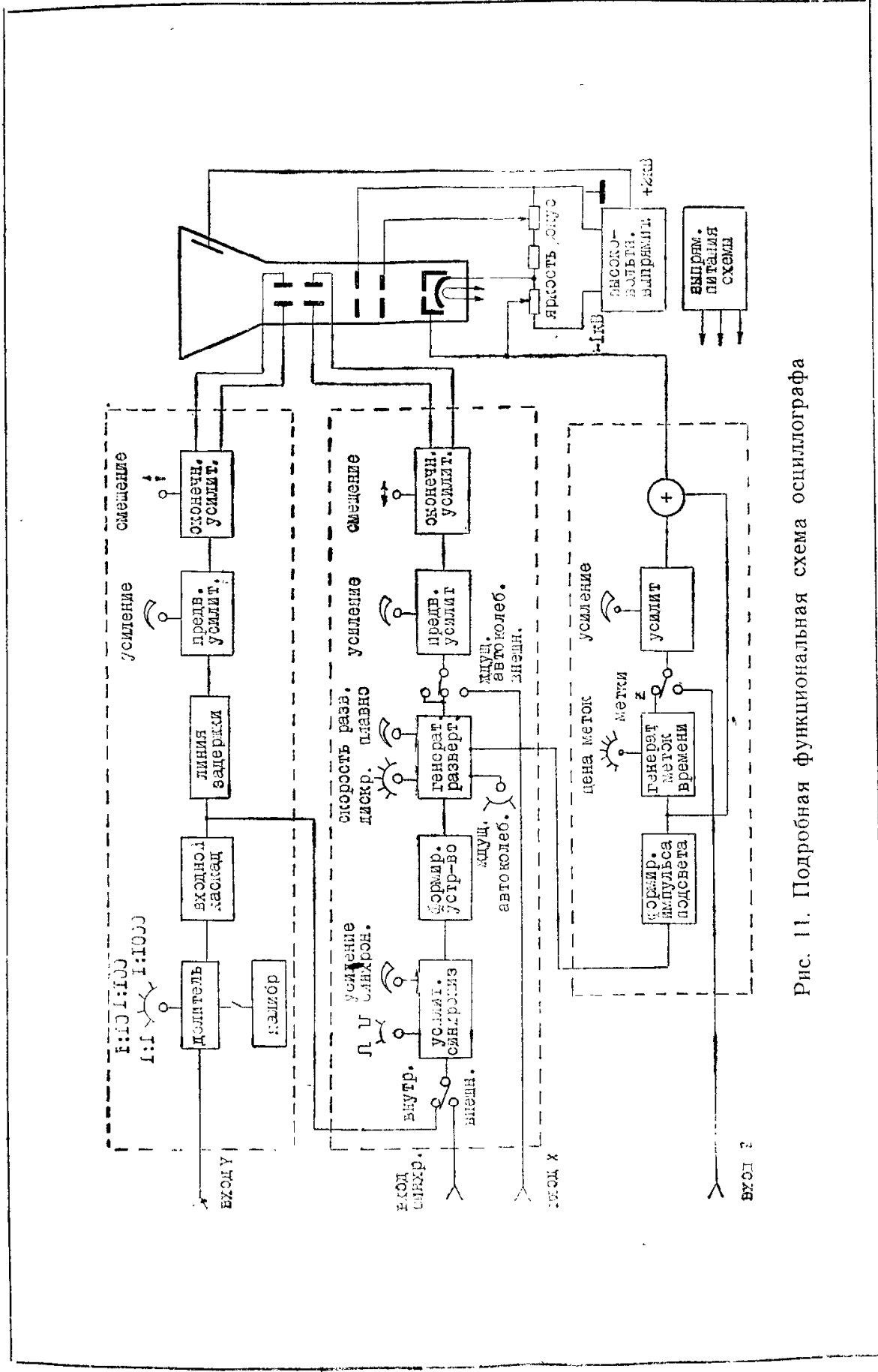


Рис. 11. Подробная функциональная схема осциллографа

входного каскада, предварительного и окончного усилителей. Назначение входного каскада — обеспечить большое входное сопротивление и малое выходное. Основное усиление и формирование полосы пропускания осуществляются в предварительном усилителе. Оконечный усилитель — мощный каскад. Амплитуда сигнала на его выходе должна быть достаточна для отклонения луча на всю высоту рабочего поля экрана ЭЛТ. В тракте вертикального канала часто включается линия задержки, необходимая для временного согласования между наблюдаемым сигналом и запуском развертки, как это описано выше. Сигнал для запуска развертки ответвляется из канала Y до линии задержки.

Канал Y обычно снабжен калибратором — источником некоторого вспомогательного сигнала известной величины, который можно подавать на вход для калибровки масштаба вертикального отклонения.

Основные требования к каналу Y:

1. Обеспечение заданной чувствительности осциллографа. Чувствительность задается либо в величинах отклонения луча, приходящихся на единицу входного сигнала,  $S_{вх}$  см/В, см/мВ и т. п., либо в обратных величинах — коэффициентах отклонения  $K_{вх}$  В/см, мВ/см и т. п. Чувствительность

$$S_{вх} = K_{Y \max} S_Y, \quad (12)$$

где  $K_{Y \max}$  — максимальный коэффициент усиления усилителя канала вертикального отклонения;

$S_Y$  — чувствительность ЭЛТ.

Требование к чувствительности осциллографа есть не что иное, как требование к коэффициенту усиления усилителя Y-канала (при выбранной ЭЛТ).

2. Равномерность амплитудно-частотной и линейность фазочастотной характеристик. Неодинаковое усиление отдельных спектральных компонент сложного сигнала приводит к частотным искажениям; неправильные (непропорциональные) фазовые сдвиги компонент вызывают фазовые искажения. Для того чтобы наблюдаемый на экране сигнал мало отличался от входного, необходимо постоянство коэффициента усиления по частоте (равномерность частотной характеристики) и линейность фазочастотной характеристики в области всех частот, где имеются существенные спектральные компоненты сигнала. Для частного случая прямоугольных импульсов это область частот, доходящая до  $f_{с \text{ верхн}} \approx \frac{2 + 3}{\tau}$ , где  $\tau$  —

длительность импульса.

В современных универсальных осциллографах верхняя граница полосы пропускания составляет 30—40 МГц, что позволяет наблюдать сигналы даже короче 0,1 мкс.

Нижняя граница полосы пропускания определяет возможность наблюдения медленных процессов (или медленных составляющих сложных сигналов). Часто бывает, что в исследуемых сигналах

медленные (низкочастотные) компоненты отсутствуют или не представляют интереса. Более того, они являются помехами (нежелательные «наводки», «фон» и т. п.). В этом случае целесообразно не пропускать низкочастотные составляющие через  $Y$ -тракт. В схеме усилителя предусматриваются разделительные конденсаторы на входе и (или) между каскадами. Это так называемый режим «с закрытым входом» (вход закрыт для постоянной и медленных составляющих). В этом режиме обычно нижняя граница полосы пропускания — единицы герц. В осциллографах старых марок это был единственный режим, так как построение усилителя с межкаскадными разделительными конденсаторами много проще, чем усилителя с гальваническими связями.

Однако в ряде задач нужно наблюдать не только переменные сигналы, но и постоянные уровни. Появилась необходимость в режиме работы  $Y$ -канала «с открытым входом». В современных универсальных осциллографах, как правило, этот режим предусматривается.

3. Линейность динамической характеристики. Динамическая характеристика усилителя — зависимость выходного напряжения от входного. При малых сигналах характеристика обычно линейна, при больших же сигналах характеристика «загибается»: увеличение входного сигнала не вызывает пропорционального роста выходного сигнала. Наступает ограничение сигнала «сверху» или «снизу». Типичный вид этих искажений показан на рис. 12. Нелинейные искажения возникают главным образом в выходном каскаде, работающем с большими сигналами. Нелинейные искажения могут возникать по вине самого экспериментатора при неправильном выборе положения входного делителя: большой входной сигнал оказывается недостаточно ослаблен и ограничивается уже во входном усилителе.

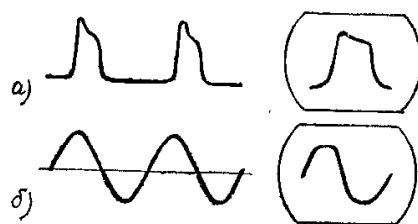


Рис. 12. Типичные нелинейные искажения:  
 а — ограничение положительного импульса «сверху»; б — ограничение синусоидального сигнала «сверху» и «снизу»

4. Большое входное сопротивление и малая входная емкость. Это необходимо для того, чтобы подключение осциллографа к исследуемой схеме не изменяло ее работы. Требование обеспечивается правильным выбором входного делителя и входного каскада.

5. Точность измерения амплитуд сигналов. Это требование обеспечивается калибровкой. Усилитель должен обладать достаточной стабильностью, с тем чтобы калибровку проводить не слишком часто. Точность измерения накладывает дополнительные требования на форму частотной характеристики, так как калибрационный сигнал обычно низкочастотный, а измеряемый может иметь произвольную частоту. Помимо канала  $Y$  на точность измерения влияет сама электроннолучевая трубка: луч ее должен иметь хорошую

фокусировку и должны быть приняты меры для уменьшения погрешностей параллакса при визуальном отсчете размера изображения.

### Блок горизонтального отклонения

Применяются три режима горизонтального отклонения луча: периодическая, или пилообразная, развертка, ждущая развертка и движение луча под действием внешнего исследуемого сигнала — внешняя развертка.

Первые два режима обеспечиваются генератором развертки — основным блоком X-канала. В третьем режиме генератор развертки выключается, вход усилителя X отсоединяется от генератора развертки и подключается к клемме «Вход X». На эту клемму нужно подать внешний сигнал. Генератору развертки предшествуют узлы, обеспечивающие его синхронизацию (в режиме периодической развертки) или запуска (в режиме ждущей). Это усилитель синхронизации и некоторый формирующий каскад. Предусматривается два режима запуска (синхронизации) генератора развертки: внутренний и внешний. В первом случае на вход усилителя синхронизации поступает сигнал из канала Y, во втором — сигнал извне, поданный на клемму «Вход синхронизации».

Требования к генератору развертки относятся главным образом к линейности прямого хода и к диапазону выбора горизонтального масштаба. В современных универсальных осциллографах диапазон изменения скорости развертки очень широк: самые быстрые развертки имеют масштаб порядка 1 мкс/см, самые медленные — единицы с/см. Как видим, изменение скорости составляет миллион раз. Переключение масштаба осуществляется дискретно, например: 1; 2; 5; 10; 20; 50 мкс/см и т. д. Предусматривается и плавное изменение скорости внутри поддиапазона.

Нелинейность напряжения развертки приводит к тому, что скорость горизонтального движения луча оказывается несколько разной в разных участках экрана. Соответственно одни участки изображаемого сигнала окажутся «сжатыми», другие «растянутыми». Поэтому нелинейность напряжения развертки нужно оценивать по непостоянству скорости, а не по абсолютному отклонению нелинейной кривой от наклонной прямой. Мерой нелинейности является наибольшая разность скоростей, отнесенная к максимальной скорости:

$$\delta_{\text{нел}} = \frac{\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{max}} - \left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{min}}}{\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{max}}} \quad (13)$$

Современные осциллографы имеют нелинейность развертки порядка единиц процентов.

В режиме ждущей развертки с внутренним запуском к генератору развертки предъявляется еще одно специфическое требование:

малое запаздывание. Дело в том, что запускающий импульс не может запустить развертку мгновенно, самым своим началом. Запуск произойдет тогда, когда фронт импульса дорастет до некоторого уровня (рис. 13). Кроме того, линейному нарастанию развертки предшествует малый переходный участок от ждущего состояния к линейному нарастанию, связанный с инерционностью цепей формирования развертки. Все это приводит к тому, что горизонтальное движение луча с постоянной скоростью начинается не в момент времени  $t_0$ , а несколько позже — в момент  $t_1$ .

Если линия задержки в Y-канале не обеспечит запаздывания сигнала  $\tau_{лз}$ , большего, чем запаздывание развертки  $\tau_p$ , то на осциллограмме начало сигнала будет потеряно (рис. 13). Линию задержки с большой величиной задержки применять невыгодно (габариты, стоимость, возможные искажения сигнала). Отсюда возникает требование малого запаздывания в генераторе развертки.

Требования к усилителю X-канала (коэффициент усиления, полоса частот, линейность, входное сопротивление) обычно ниже требований к Y-каналу. Это делается из соображений экономии. Достаточно жесткими являются лишь требования к стабильности усиления в тех осциллографах, где предусматриваются калиброванные масштабы скоростей. В осциллографах последних марок отсутствует устройство, создающее «метки времени» (о них ниже). Вместо этого гарантируется калиброванный масштаб скоростей без проверки. Понятно, что такая гарантия возможна лишь при высокой стабильности скорости нарастания напряжения как в самом генераторе развертки, так и после усиления.

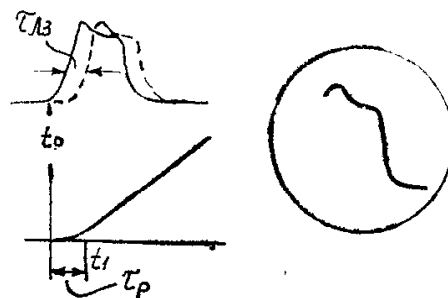


Рис. 13. Эффект «пропадания» переднего фронта импульса на осциллограмме из-за того, что задержка развертки  $\tau_p$  превышает задержку сигнала  $\tau_{лз}$

### Блок управления яркостью луча

Помимо постоянного смещения на управляющий электрод ЭЛТ подаются некоторые переменные напряжения (рис. 14), модулирующие луч по яркости. Эта модуляция выполняет следующие задачи:

1. Подсветка прямого хода луча и гашение обратного хода. При анализе осциллограмм мы полагали, что обратный ход луча происходит мгновенно, так что изображение на экране возникает только при прямом ходе. На самом деле напряжение не может изменяться скачком, и обратный ход длится хотя и малое, но конечное время. При движении луча в обратном направлении на экране получается некоторый рисунок, мешающий наблюдать основную осциллограмму. Для исключения этого эффекта луч гасят на время об-

ратного хода. С этой целью синхронно с пилообразной разверткой формируется напряжение прямоугольной формы (рис. 14 б, в). Во время обратного хода на управляющий электрод ЭЛТ воздействуют отрицательные импульсы, снижающие потенциал электрода ниже уровня отсечки луча. В режиме ждущей развертки нужно погасить луч не только на время обратного хода, но и на все то время, когда генератор «ждет» прихода запускающего импульса. Поскольку прямой ход развертки составляет обычно малую часть общего времени, принято говорить не о гашении луча, а наоборот, о подсветке луча на время прямого хода (рис. 14, д, е).

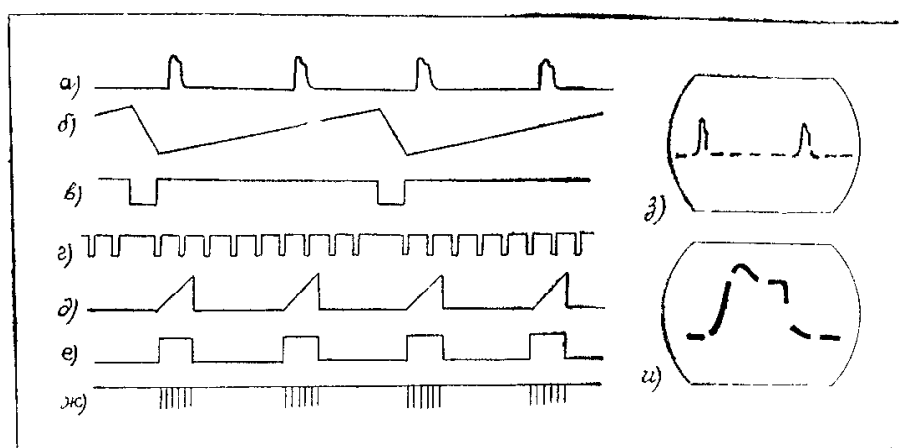


Рис. 14. Напряжения, модулирующие яркость луча:  
*а* — исследуемый сигнал; *б* — пилообразная развертка; *в* — импульсы гашения обратного хода луча; *г* — метки времени; *д* — ждущая развертка; *е* — импульсы подсвета; *ж* — метки времени *з*, *и* — осциллограммы

Вполне понятно, что как при пилообразной, так и при ждущей развертке положительный фронт импульса подсветки должен быть жестко связан с началом прямого хода развертки, а отрицательный — с обратным. Поэтому импульс подсветки вырабатывается не независимо, а задается от генератора развертки, как показано на рис. 11.

2. Метки времени. В осциллографах некоторых типов имеются так называемые «метки времени» для измерения по осциллограмме временных интервалов. С этой целью в канал *Z* включен специальный генератор, вырабатывающий «пачки» узких прямоугольных импульсов с калиброванным периодом (рис. 14, г, ж). Предусмотрено переключение периода, определяющего «цену» меток времени (1 мс; 100, 10, 1, 0,1 мкс). Импульсы меток времени подаются на усилитель канала *Z* и затем на модулятор трубки (иногда на катод). На осциллограмме образуются затемненные точки, дающие возможность определить интервал простым подсчетом (рис. 14, з, и). Синхронность меток с разверткой обеспечивается тем, что генератор меток времени запускается одновременно с началом прямого хода развертки и прекращает генерировать с окон-

чаннем прямого хода. Для управления работой генератора удобно использовать прямоугольный импульс, сформированный в цепях подсетки прямого хода.

3. Подсветка луча сигналом. В осциллографе предусмотрена возможность подачи внешнего сигнала в канал  $Z$ . Для этого вход усилителя  $Z$  отключается от генератора меток времени и соединяется с клеммой «Вход  $Z$ ». Этот режим позволяет на осциллограмме сигнала, поданного нормально на вход  $Y$ , получить светящуюся (или затемненную) точку, соответствующую другому сигналу, поданному на вход  $Z$ .

## РАБОТА С ОСЦИЛЛОГРАФОМ

В настоящем разделе, рассчитанном на студентов, не имеющих опыта работы с осциллографом, даются некоторые советы о порядке ознакомления с управлением осциллографом. Этот порядок, конечно, не является обязательным.

1. Сопоставьте регулировки, расположенные на лицевой панели, с функциональной схемой осциллографа. Отметьте, какие регулировки относятся к вертикальному каналу (каналу сигнала), а какие — к горизонтальному (каналу развертки).

2. Вначале, не подавая сигнала на осциллограф, включите в генераторе развертки режим автоколебательной (пилообразной) развертки. При этом на экране должна появиться линия развертки. Подберите оптимальную яркость, фокус и смещение развертки по вертикали и горизонтали. Усиление  $X$  отрегулируйте так, чтобы видеть всю развертку в пределах экрана. Типична такая ошибка: усиление  $X$  устанавливают излишне большим; при этом линия развертки растянута так, что большая часть ее уходит за пределы экрана. В дальнейшем при подаче сигнала он может оказаться вне поля зрения. Поэтому важно убедиться, что видна вся развертка.

3. Подайте на вход  $Y$  какой-либо сигнал (синусоидальный, импульсный). При этом на экране появляется некоторое изображение, как правило, бегущее. Не обращая пока что внимания на то, что картинка не остановлена, отрегулируйте ее вертикальный размер, пользуясь входным делителем и плавной регулировкой усиления  $Y$ . Добейтесь того, чтобы вертикальный размер соответствовал значительной части экрана, не выходя за его пределы.

Убедитесь в том, что вертикальный размер изображения чувствителен к регулировке амплитуды сигнала в генераторе сигнала, от которого он подан. Эта проверка применяется вот для чего. Бывает, что исследуемый сигнал поступает на осциллограф вместе с помехами (наводками, «фоном» и т. п.). Если сигнал мал или нарушен хороший контакт в соединениях, то картинка на экране вызвана не столько сигналом, сколько помехами. В этом случае регулировка сигнала в генераторе почти не влияет на вертикальный размер изображения.

Убедившись в правильном прохождении сигнала через  $Y$ -канал, приступайте к синхронизации осциллографа.

4. Установите режим внутренней синхронизации. Переключая диапазоны скоростей (частот) развертки, добейтесь того, чтобы на ней укладывалось несколько периодов сигнала (3—4, не больше). Это можно увидеть, даже когда осциллограмма не остановлена. Затем добейтесь остановки осциллограммы плавной регулировкой скорости развертки и плавной регулировкой усиления синхронизации. Освойтесь с этой регулировкой: переключайте диапазон скоростей в сторону больших и меньших скоростей, останавливайте картинку с изображением одного, двух, трех и более периодов. Обратите внимание на то, как связано переключение скорости развертки с растяжением или сжатием осциллограммы, с тем чтобы в дальнейшем пользоваться этой регулировкой вполне сознательно.

Может оказаться, что в режиме автоколебательной развертки не удастся получить устойчивую осциллограмму. Это бывает, например, при нестабильности частоты исследуемого сигнала. Попробуйте получить устойчивую осциллограмму в режиме ждущей развертки.

5. Установите режим ждущей развертки при внутренней синхронизации (внутреннем запуске). Полезно убедиться, что развертка действительно «ждет». Для этого временно отсоедините сигнал от входа  $Y$ . Линия развертки на экране должна исчезнуть. Если она не исчезает, это означает, что развертка запускается не тем сигналом, которым Вы хотите ее запустить. Причиной могут быть наводки или неустойчивая работа самого генератора развертки. Ликвидировать это можно регулировкой усиления синхронизации. Добейтесь того, чтобы развертка исчезала при отклонении сигнала от входа  $Y$  и появлялась при подаче сигнала.

При работе с импульсным сигналом не забудьте обратить внимание на выбор полярности запуска. Получив устойчивую осциллограмму, переключайте диапазоны скоростей развертки и установите такую скорость, чтобы увидеть на экране один импульс в крупном масштабе.

6. Освойтесь с режимом внешнего запуска ждущей развертки. В качестве импульса запуска вначале можно использовать тот же сигнал, который подан на вход  $Y$ , подведя его отдельным проводом к входной клемме внешней синхронизации. Убедитесь, что ждущая развертка пропадает, когда сигнал запуска отсоединен от клеммы, и появляется при подаче запускающего сигнала.

Проверив правильность внешнего запуска от исследуемого сигнала, перейдите к запуску ждущей развертки опережающим сигналом. В большинстве лабораторных импульсных генераторов предусмотрен вывод опережающего синхроимпульса, причем обычно можно регулировать задержку импульса на основном выходе генератора относительно синхроимпульса. Подайте синхроимпульсы на запуск ждущей развертки, а основной импульс на вход  $Y$ . При этом нужно помнить о правильном сочетании скорости развертки и временного расположения синхроимпульсов и исследуемых импульсов. Пусть, например, временное расположение такое, как пока-



зано на рис. 15, а, б. Скорость ждущей развертки (а следовательно, и ее длительность) выбрана так, как показано на рис. 15, в.

Изображение импульса (рис. 15, д) будет находиться посередине экрана, но в очень мелком масштабе. Желая растянуть картинку, мы увеличим скорость развертки. При этом ее длительность уменьшится (рис. 15, з). Сигнал окажется за пределами развертки, следовательно, на экране будет видна «пустая» линия (рис. 15, е). Необходимо уменьшить задержку  $\tau_3$  в генераторе сигналов, чтобы импульс вновь попал на развертку.

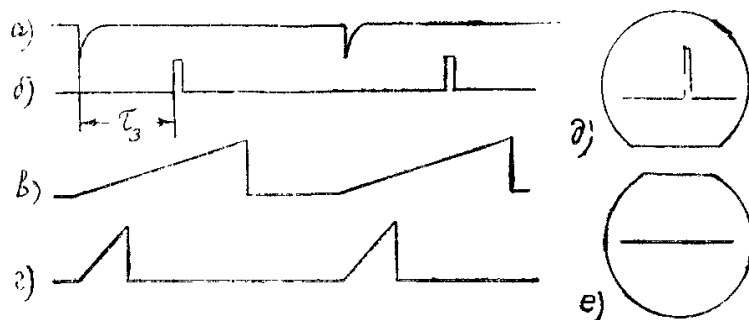


Рис. 15. Пример неудачного выбора взаимного расположения синхроимпульсов (а), наблюдаемых сигналов (б) и разверток (в, з). На осциллограмме (д) масштаб слишком мелкий, на осциллограмме (е) импульс оказался вне наблюдаемого участка

7. Работа с внешней разверткой. В этом режиме развертывающий сигнал должен быть подан на вход X. Однако этого недостаточно. Как видно из функциональной схемы (см. рис. 11), необходимо отключить вход усилителя X от генератора развертки и соединить его с входной клеммой канала X.

## КАНАЛ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ. ПРОБЛЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ

Метрологические характеристики осциллографа как измерительного прибора, предназначенного не только для наблюдения формы колебаний, но и измерения мгновенных значений в любой точке сигнала, налагают весьма жесткие требования на характеристики, в первую очередь, канала вертикального отклонения.

При разработке высокостабильного усилителя на нестабильных транзисторах, как известно, широко используется отрицательная обратная связь (ООС). При достаточно глубокой обратной связи ею усиление почти не зависит от нестабильного коэффициента усиления самих транзисторов, на которых он выполнен, и определяется величиной обратной связи. Но отрицательная обратная связь уменьшает усиление, так что повышение стабильности достигается ценой увеличения числа каскадов, необходимого для получения большого запаса усиления. Естественно, в выборе глубины обратной связи нужен компромисс.

В усилителях переменного напряжения возможно применение раздельной обратной связи: одни элементы схемы определяют ООС по постоянному току, т. е. по положению рабочей точки на характеристике транзистора, а другие — по переменной составляющей — по сигналу. Задача ООС первого типа — стабилизировать режим, задача ООС второго типа — стабилизировать усиление. Именно повышение глубины ООС второго типа и снижает усиление.

Отдельные каскады усилителя разделены конденсаторами, поэтому температурные изменения постоянных токов в предыдущем каскаде не влияют на работу последующего каскада, в то время как переменные сигналы свободно передаются через разделительные конденсаторы.

В современных осциллографах, как это отмечалось выше, помимо закрытого входа (для переменных сигналов) предусматривается и открытый. Полезным сигналом в этом случае является не только переменная составляющая, но и абсолютное значение уровня, относительно которого происходят колебания. В канале должны быть обеспечены гальванические связи между каскадами от входа до отклоняющих пластин ЭЛТ. Смещение рабочей точки любого каскада, вызванное режимной нестабильностью, воспринимается как появление сигнала. Это так называемый дрейф нуля, борьба с которым представляет собой более сложную задачу, чем просто стабилизация усиления.

Для анализа и расчета возникающий во всех каскадах усилителя дрейф удобно «приводить» к входу усилителя. При этом считается, что усилитель свободен от дрейфа, но на его входе действует эквивалентный источник дрейфа совместно с полезным сигналом. Измерения полезного сигнала надежны и точны только при условии, что уровень входного сигнала существенно превышает напряжение приведенного дрейфа.

Отрицательная обратная связь снижает напряжение дрейфа, однако ровно во столько же раз, во сколько снижается и усиление. Это видно из формул, известных из теории усилителей с обратной связью:

$$K_{о.с} = \frac{K}{F}; \quad U_{др о.с} = \frac{U_{др}}{F}, \quad (14)$$

где  $K$  — коэффициент усиления усилителя без обратной связи;  
 $K_{о.с}$  — коэффициент усиления усилителя с обратной связью;  
 $U_{др}$ ,  $U_{др о.с}$  — соответственно напряжения дрейфа без обратной связи и с ее введением;

$F$  — фактор (глубина) обратной связи:

$$F = 1 + \kappa K,$$

$\kappa$  — коэффициент передачи цепи обратной связи.

Таким образом, введение отрицательной обратной связи ничего не дает для улучшения соотношения между полезным сигналом и дрейфом.

Наиболее эффективным и распространенным на практике методом борьбы с дрейфом является применение двухтактной (балансной) схемы усилителя. Весь усилитель от входа до пластин имеет симметричные «плечи». Полезным сигналом являются не сами напряжения на выходах каскадов, а разность напряжений плеч.

На рис. 16 приведена простейшая схема двухкаскадного балансного усилителя. Входной сигнал подается противофазно на базы транзисторов  $T_1$  и  $T_1'$ . Усиленный сигнал с их коллекторов гальванически (например, с помощью делителей на сопротивлениях) подается на входы второго каскада  $T_2$  и  $T_2'$  и так далее до отклоняющих пластин. Отклонение луча определяется именно разностью потенциалов на выходах плеч усилителя.

Борьба с дрейфом основывается на отличии сигнала от дрейфа не по частоте, как в усилителях переменного напряжения, а по фазе: полезный сигнал вызывает во всех каскадах противофазные изменения, а температурный дрейф — синфазные. При идеальной симметрии плеч действие дрейфа полностью исключается. Практически из-за разброса параметров плеч двухтактного усилителя дрейф не ликвидируется полностью, но снижается весьма существенно, особенно при подборе полупроводниковых приборов по парам.

Нужно отметить, что двухтактное построение усилителя не снимает все же задачи стабилизации режима всех элементов схем в отдельности, как это могло бы показаться. Дело в том, что при изменении рабочей точки транзистора меняется и его усиление. Большие изменения режима могут привести к заходу в нелинейную область, что вызовет искажение формы сигнала. Поэтому схема, приведенная на рис. 16, практически не работоспособна. Она должна быть дополнена элементами стабилизации.

Рассмотрим схему одного балансного каскада, приведенную на рис. 17, а. Резисторы, включенные в эмиттерные цепи, создают отрицательную обратную связь, причем эквивалентные сопротивления для ООС по сигналу и режиму определяются разными комбинациями резисторов  $r$ ,  $R_1$ ,  $R_1'$ ,  $R_2$ .

Для вычисления эквивалентных сопротивлений обратной связи дадим приращения токам эмиттеров  $\Delta I_{\text{Э}}$  и  $\Delta I_{\text{Э}'}$  и вычислим вызванные ими приращения потенциалов точек А и Б  $\Delta U_{\text{А}}$  и  $\Delta U_{\text{Б}}$ . Тогда эквивалентные сопротивления обратной связи в эмиттерах транзисторов  $T_1$  и  $T_1'$  определяются как

$$R_{\text{экв}} = \frac{\Delta U_{\text{А}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{Э}'}}.$$

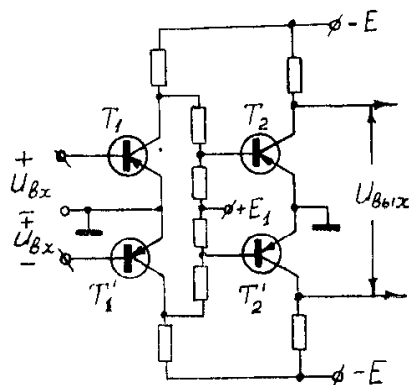


Рис. 16. Двухкаскадный балансный усилитель

Мы убедимся в том, что  $R_{\text{экв}}$  для синфазных и противофазных приращений по-разному зависят от сопротивлений резисторов, стоящих в схеме. Введем обозначения:  $R_{=}$  — эквивалентное сопротивление ООС для режимных (синфазных) изменений;  $R_{\sim}$  — эквивалентное сопротивление ООС для сигналов.

Пусть вначале режимы транзисторов одинаковы, точки А и Б эквипотенциальны, ток в сопротивлении  $r$  отсутствует.

В случае синфазных изменений  $\Delta I_{\text{э}} = \Delta I_{\text{э}'}$ .

Потенциалы точек А и Б по-прежнему равны между собой, и ток  $\Delta I_r = 0$ . Как видим, резистор  $r$  при синфазных изменениях токов как бы отсутствует.

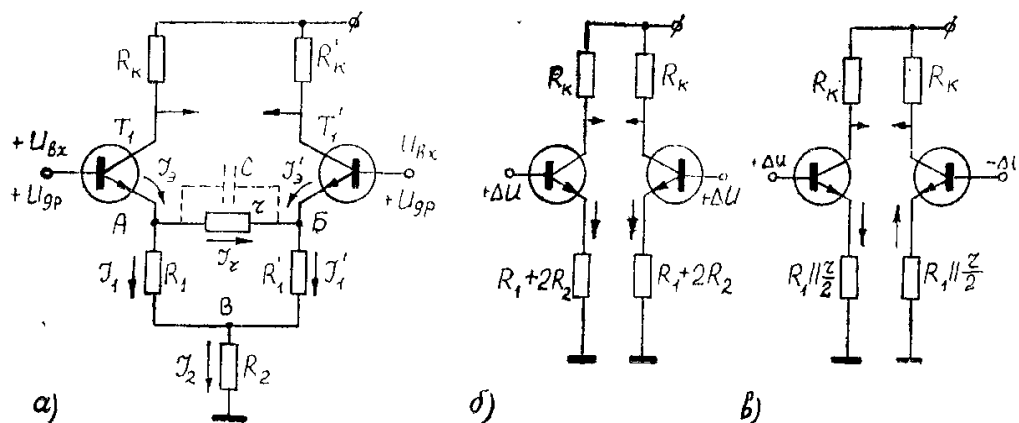


Рис. 17. Балансный усилитель с отрицательной обратной связью для стабилизации усиления и режима:  
 а — принципиальная схема; б — эквивалентная схема для синфазных изменений; в — эквивалентная схема для противофазных изменений

Имеем

$$\Delta I_1 = \Delta I_{\text{э}} = \Delta I_{\text{э}'} = \Delta I_1',$$

$$\Delta I_2 = \Delta I_1 + \Delta I_1' = 2\Delta I_{\text{э}},$$

$$\Delta U_{\text{А}} = \Delta U_{\text{Б}} = \Delta I_1 R_1 + \Delta I_2 R_2 = \Delta I_{\text{э}} (R_1 + 2R_2).$$

Эквивалентное сопротивление обратной связи для синфазных изменений

$$R_{=} = \frac{\Delta U_{\text{А}}}{\Delta I_{\text{э}}} = R_1 + 2R_2. \quad (15)$$

Таким образом, режим и его синфазные изменения могут быть рассчитаны, как если бы транзисторы  $T_1$  и  $T_1'$  были включены без связи между собой, но в эмиттере каждого было бы сопротивление (15) (рис 17, б).

При противофазных изменениях  $\Delta I_{\text{э}} = -\Delta I_{\text{э}'}$ .

Нетрудно видеть, что изменения токов  $\Delta I_1$  и  $\Delta I_1'$  также противофазны. Действительно,

$$\Delta I_1 = \Delta I_{\text{э}} - \Delta I_r,$$

$$\Delta I_1' = \Delta I_{\text{э}'} + \Delta I_r = -(\Delta I_{\text{э}} - \Delta I_r) = -\Delta I_1.$$

Приращение тока в общем сопротивлении  $R_2$

$$\Delta I_2 = \Delta I_1 + \Delta I_1' = 0.$$

Поэтому и приращение потенциала точки В равно нулю. Точку В для рассматриваемых противофазных приращений можно считать фиксированной (заземленной).

Изменения потенциалов точек А и Б противофазны:

$$\Delta U_A = \Delta I_1 R_1 + \Delta I_2 R_2 = \Delta I_1 R_1,$$

$$\Delta U_B = \Delta I_1' R_1 + \Delta I_2 R_2 = \Delta I_1' R_1 = -\Delta U_A.$$

Ток в резисторе  $r$

$$\Delta I_r = \frac{\Delta U_A - \Delta U_B}{r} = \frac{2\Delta U_A}{r}.$$

Имеем

$$\Delta I_{\Sigma} = \Delta I_1 + \Delta I_r = \frac{\Delta U_A}{R_1} + \frac{2\Delta U_A}{r} = \Delta U_A \left( \frac{1}{R_1} + \frac{2}{r} \right).$$

Отсюда эквивалентное сопротивление обратной связи

$$R_{\sim} = \frac{1}{1/R_1 + 2/r} = \frac{R_1 r}{2(R_1 + r/2)} = R_1 \parallel r/2. \quad (16)$$

Итак, усиление каскада и его стабильность могут быть рассчитаны, как для схемы 17, в, где сопротивление обратной связи представляет собой параллельное соединение  $R_1$  и  $r/2$ . Нетрудно видеть, что выбором тех или иных значений резисторов можно по-разному устанавливать глубину обратной связи по режиму и сигналу.

Так, например, если выбрать  $R_2 \gg r$ , то можно обеспечить очень сильное подавление синфазных изменений и в то же время получить усиление противофазных, тем самым обеспечить жесткую стабилизацию режима при достаточно большом усилении сигнала.

Попутно отметим, что в двухтактной схеме удобно использовать резистор  $r$  для регулировки усиления без влияния на режим.

Часто эмиттерную цепь используют также для коррекции спада частотной характеристики каскада в области верхних частот. Для этого параллельно резистору  $r$  включают конденсатор, как показано на рис. 17, а, что обеспечивает снижение глубины обратной связи с ростом частоты и, следовательно, подъем усиления.

Заметим, что для балансного построения усилителя совсем не обязательна двухтактная подача сигнала на базы транзисторов в двух плечах усилителя. Сигнал можно подавать только на одну базу, а потенциал второй — фиксировать.

Нетрудно видеть, что несимметричная подача, скажем, на первый вход напряжения  $+U$  равносильна синфазной подаче на оба входа напряжения  $+\frac{U}{2}$  и одновременно двухтактной подаче на оба входа  $+\frac{U}{2}$  и  $-\frac{U}{2}$ . При очень сильной обратной связи по

сдвигами фазы подача  $+\frac{U}{2}$  на оба входа не вызывает появления выходного сигнала. Остается только выходной сигнал, вызванный двухтактной подачей  $+\frac{U}{2}$  и  $-\frac{U}{2}$ . Таким образом, при однотактной подаче каскад дает лишь вдвое меньшее усиление.

Помимо балансного построения усилителя и в дополнение к нему для борьбы с дрейфом применяется также метод температурной компенсации. Рассмотрим его принцип на примере простейшего однотактного усилителя (рис. 18, а), в котором использована распространенная схема температурной компенсации — включение в цепь смещения базы термочувствительного резистора  $R_2$  с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При возрастании температуры коллекторный ток транзистора стремится увеличиться. Одновременно уменьшается сопротивление резистора  $R_2$ , снижается смещение на базе, что приводит к компенсирующему уменьшению коллекторного тока.

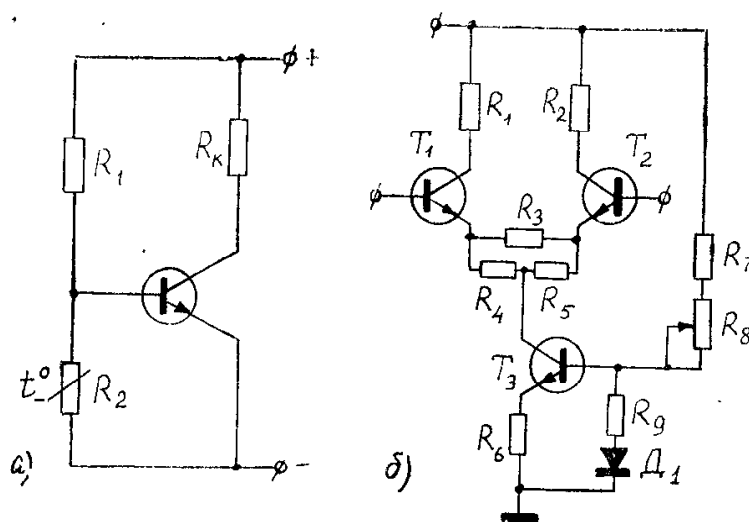


Рис. 18. Температурная компенсация:  
 а — простейшая схема усилителя с температурной компенсацией; б — практическая схема балансного усилителя с комбинированной системой стабилизации

В качестве терморезистора  $R_2$  используют термисторы и чаще сопротивления  $p-n$ -переходов (сопротивления диодов при прямом или обратном смещении, сопротивление переходов эмиттер-коллектор транзисторов), а также комбинации обычных резисторов и  $p-n$ -переходов. На рис. 18, б приведена одна из практических схем балансного усилителя на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  с комбинированной схемой стабилизации режима: сильная отрицательная обратная связь по режиму (общее сопротивление в эмиттерах) и температурная компенсация. В качестве общего эмиттерного сопротивления используется выходное сопротивление со стороны коллектора вспомогательного транзистора  $T_3$ . В цепи базы  $T_3$  включена комбинация резистора  $R_9$  и диода  $D_1$ , играющая роль термочув-

ствительного сопротивления. В эмиттере  $T_3$  поставлен резистор  $R_6$  для дополнительной стабилизации тока  $T_3$ .

Таким образом, нижняя часть схемы представляет собой генератор стабильного тока с очень большим выходным сопротивлением, что обеспечивает высокую степень стабилизации режима транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ .

## ВХОДНАЯ ЦЕПЬ

Входная цепь, включающая в себя делитель и первый каскад усилителя, выполняет две основные задачи:

обеспечивает работу осциллографа в большом динамическом диапазоне сигналов;

обеспечивает большое и постоянное входное сопротивление и малую входную емкость.

К этим задачам часто добавляются и другие: например, удобная подача калибрационного сигнала, переход от однотактного входного сигнала к двухтактной подаче на основной усилитель и защита транзисторов усилителя от разрушения при случайной подаче большого сигнала.

Согласно типовым техническим условиям, амплитуда сигналов может составлять от единиц милливольт (иногда и меньше) до 100—200 В. Усиление усилителя рассчитывается, исходя из самых малых сигналов. Тогда большие сигналы необходимо ослаблять перед подачей их на усилитель. Это и обеспечивается ступенчатым входным делителем.

Делитель имеет положения 1:1; 1:10; 1:100; 1:1000. В современных универсальных осциллографах приняты и более частые градации: 1:1; 1:2,5; 1:5; 1:10; 1:25; 1:50 и т. д.

Коэффициент усиления усилителя вертикального канала стабилизирован, поэтому входной делитель определяет, в сущности, масштаб изображения по вертикали. Часто положения делителя маркируются сразу в значениях масштаба, что очень удобно. Однако для того чтобы такое обозначение соответствовало действительности, нужно обеспечить постоянство коэффициента деления во всем диапазоне рабочих частот и неизменность входного сопротивления делителя на всех ступенях деления.

В простейшем варианте делитель выполняется, как показано на рис. 19. Нетрудно получить условия, при которых коэффициент деления не зависит от частоты. Так, например, для второго положения переключателя коэффициент деления на постоянном токе определяется только величинами резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

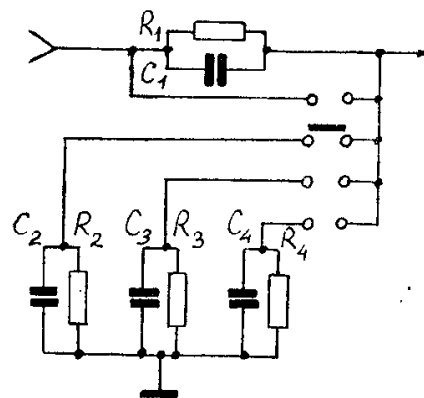


Рис. 19. Простейший частотно-компенсированный делитель

$$K(0) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Потребуем, чтобы коэффициент деления на любой частоте был бы тем же самым:

$$K(\omega) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Подставив выражения для  $Z_1$  и  $Z_2$ , после преобразований получим

$$K(\omega) = \frac{R_2}{R_2 + R_1 \frac{1 + j\omega\tau_1}{1 + j\omega\tau_2}}, \quad (17)$$

где введены обозначения постоянных времени  $\tau_1 = R_1 C_1$  и  $\tau_2 = R_2 C_2$ . Из (17) видно, что необходимо равенство постоянных времени.

Итак, условием частотной независимости делителя является равенство постоянных времени всех плеч:

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3 = R_4 C_4. \quad (18)$$

На первый взгляд, кажется, что включение емкостей излишне: делитель, состоящий из одних резисторов, также обеспечивает частотную независимость. Это было бы справедливо, если бы отсутствовали паразитные емкости монтажа и входная емкость первого каскада усилителя. Фактически емкости, шунтирующие плечи делителя, все равно присутствуют, даже если конденсаторов на схеме нет. Но величины паразитных емкостей нестабильны и не подчиняются требованию (18). Поэтому специально включают конденсаторы  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , причем обычно ставят подстроечные (полупеременные), регулируемые в процессе наладки осциллографа с учетом фактических паразитных емкостей.

Простейший делитель не обеспечивает постоянства входного сопротивления и, кроме того, при большом числе ступеней деления такие делители не экономичны.

Более совершенны делители на основе П-образных звеньев. На рис. 20 показан (несколько упрощенно) делитель осциллографа С1-68. Он выполнен в виде двухзвенной цепочки с коммутируемыми звеньями. Звено I может включать один из четырехполюсников А, Б, В, дающих ослабление в 10, 100 и 1000 раз, звено II — четырехполюсники Г или Д с ослаблением в 2,5 и 5 раз. Имеется также возможность прямой передачи. Различные комбинации включений звеньев дают широкий диапазон выбора масштабов. Все звенья имеют одинаковую структуру и отличаются лишь номиналами.

После делителя сигнал поступает на входной каскад. Главное требование к нему — получение большого входного сопротивления. Поскольку схемы на биполярных транзисторах не имеют доста-



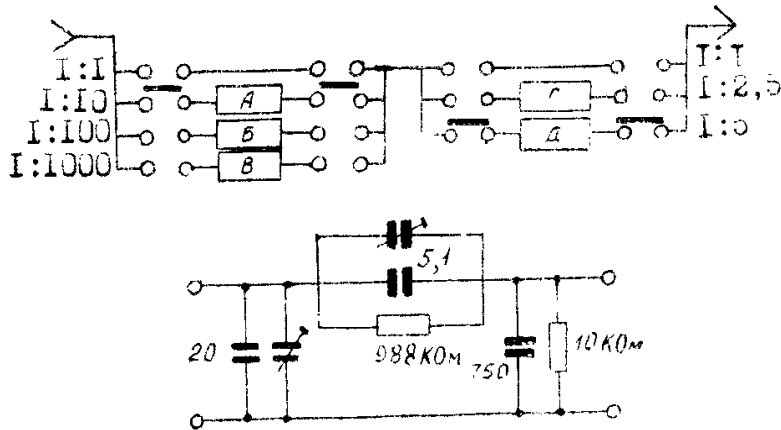


Рис. 20. Входной делитель осциллографа С1-68 и схема одного из четырехполюсников (ослабление 1:100)

точно большого входного сопротивления, в последнее время все чаще во входном каскаде используются полевые транзисторы. Отсутствие тока в цепи затвора обеспечивает очень большое входное сопротивление.

На рис. 21 дана упрощенная схема входного каскада осциллографа С1-68. Каскад собран на полевых транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  типа 2П303Б по балансной схеме, дающей возможность перейти от одноконтной подачи входного сигнала к двухконтной подаче на основной усилитель. Сигнал подается на затвор  $T_1$ , а потенциал затвора  $T_2$  фиксирован. На входе транзистора  $T_1$  предусмотрена защита от разрушения при случайной подаче больших сигналов. Эту роль выполняет двухсторонний ограничитель (резистор  $R_1$  и диоды  $D_1$  и  $D_2$ ). Нормальный размах сигнала на затворе  $T_1$  составляет единицы-десятки милливольт. Для таких малых сигналов сопротивление диодов очень велико и они как бы отсутствуют. Для

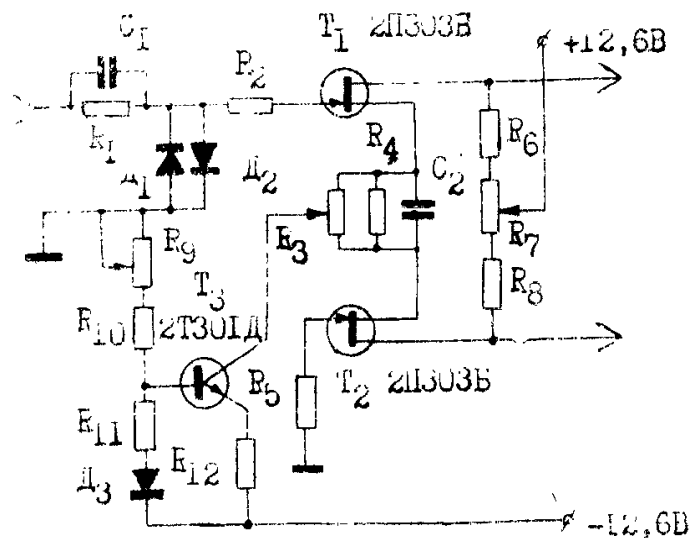


Рис. 21. Входной каскад осциллографа С1-68

больших же сигналов диоды представляют собой практически короткое замыкание (при положительной полярности сигнала — диод  $D_2$ , при отрицательной —  $D_1$ ).

В цепях истоков полевых транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  включена схема стабилизации, использующая генератор тока на транзисторе  $T_3$  с термокомпенсацией в цепи базы. Она подобна рассмотренной выше (см. рис. 18).

Нагрузкой каскада являются резисторы  $R_6$ ,  $R_8$  и потенциометр  $R_7$ , включенные между стоками  $T_1$  и  $T_2$ . Питание от источника  $+12,6$  В подводится к средней точке нагрузки. Регулировки  $R_3$  и  $R_7$  служат для симметрирования каскада, причем одна из них ( $R_7$ ) оперативная, вынесенная на лицевую панель, а регулировка  $R_3$  подстроечная, устанавливаемая на заводе.

Входной каскад дает небольшое усиление (около 3).

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ И ОКОНЕЧНЫЙ УСИЛИТЕЛИ

Основное усиление обеспечивается предварительным усилителем, содержащим обычно 4-5 каскадов усиления. Практические схемы усилителей очень разнообразны, и их выбор зависит от конкретных технических характеристик данной марки осциллографа: усиления, полосы частот. Если не требуется прохождения сигналов постоянного тока (или если режим с открытым входом не является основным), предварительный усилитель строится по одноконтурной схеме. Если же требования в отношении дрейфа жесткие, то все каскады усилителя построены по балансной схеме со строгой симметрией.

Оконечный каскад усилителя всегда выполняется по балансной схеме для обеспечения симметричной подачи на отклоняющие пластины. Оконечный каскад должен давать на выходе сигналы большой амплитуды, что представляет собой известную трудность для транзисторной техники. В ряде марок осциллографов в окончательном каскаде применяется каскадное включение транзисторов, при котором роль активного элемента выполняет не один транзистор, а комбинация нескольких транзисторов.

Создание мощных широкополосных транзисторов, работающих при напряжении питания до 100 В, позволило вернуться к обычным схемам окончательного каскада.

На рис. 22 приведена упрощенная схема двух последних каскадов предварительного усилителя и окончательного усилителя осциллографа С1-68. Сигнал с выхода первых каскадов предварительного усилителя, не показанных на рисунке, подводится к базам транзисторов микросхемы МС-2 типа 2УС284. Эти транзисторы работают по типовой схеме балансного усилителя, рассмотренной ранее. В цепи эмиттеров включены резисторы, обеспечивающие стабилизацию как по режиму, так и по сигналу; конденсатор  $C_1$  служит для коррекции частотной характеристики в области верхних частот.

Начальные потенциалы на базах транзисторов зависят от положения движков потенциометров  $R_4$  и  $R_5$ . Назначение этих регулировок — смещение луча осциллографа по вертикали, причем одна из регулировок ( $R_4$ ) оперативная, выведенная на переднюю панель, а другая —  $R_5$  установочная, служащая для настройки симметрии схемы при среднем положении  $R_4$ .

С нагрузок в коллекторных цепях сигнал передается на транзисторы  $T_1$  и  $T_2$ , включенные по схеме эмиттерных повторителей,

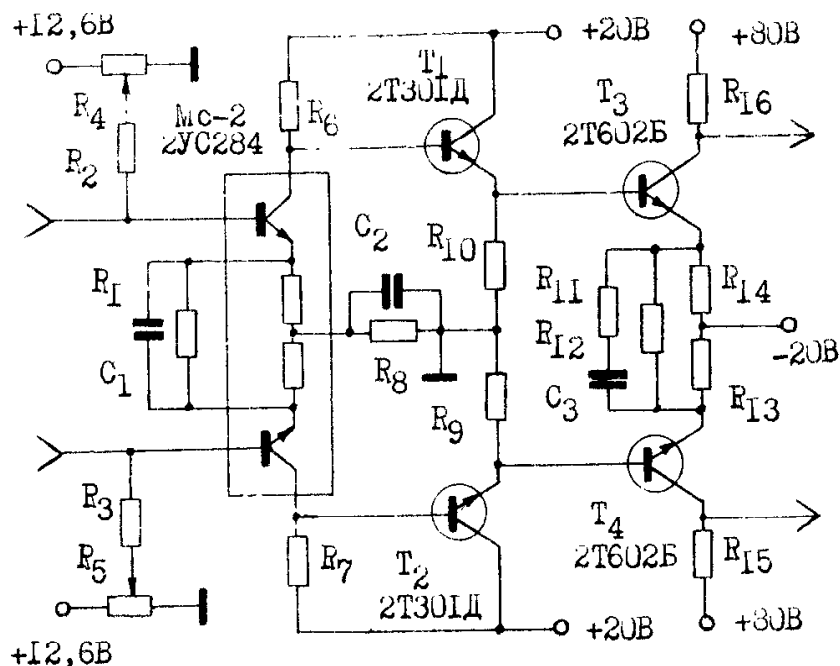


Рис. 22. Схема последних каскадов предварительного усилителя и оконечного каскада осциллографа С1-68

обеспечивающих раскачку мощных транзисторов оконечного каскада. Оконечный каскад выполнен на транзисторах  $T_3$  и  $T_4$  типа 2Т602Б.

Согласно техническим условиям на осциллограф С1-68, вертикальный размер рабочего поля экрана, где гарантируются незначительные нелинейные искажения, составляет 60 мм. При чувствительности ЭЛТ по вертикально отклоняющим пластинам, равной 1 мм/В, для отклонения луча в пределах рабочего поля требуется размах сигнала 60 В. С учетом двухтактного отклонения размах сигнала в каждом плече должен быть не менее 30 В. Выбранные транзисторы работают при напряжении питания 100 В (в схеме рис. 22 напряжение питания оконечного каскада обеспечивается двумя источниками: + 80 В и - 20 В). При питании 100 В легко выбирается необходимый линейный участок более 30 В. Стабилизация каскада выполнена по обычной схеме с помощью комбинации резисторов в эмиттерной цепи. Коррекция частотной характеристики выполняется с помощью  $R_{11}$ ,  $C_3$ .

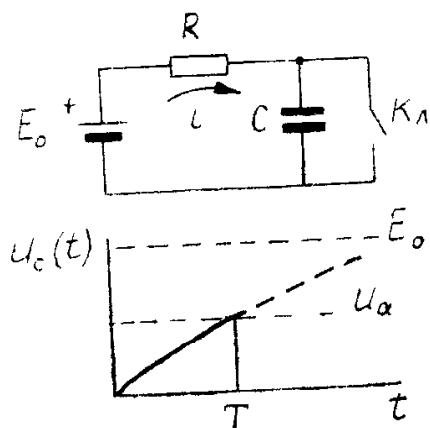
Применение в схеме усилителя нескольких источников питания (+ 12,6 В, + 20 В, + 80 В, - 20 В) позволяет осуществить непо-

средственные связи между каскадами без каких-либо согласующих делителей.

## ГЕНЕРАТОР РАЗВЕРТКИ. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНО-НАРАСТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Генератор развертки — наиболее специфический узел схемы осциллографа. Прямой ход развертки формируется обычно при заряде конденсатора, обратный — при замыкании некоторого электронного ключа, закорачивающего зарядный конденсатор.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 23. В исходном состоянии ключ  $K_1$  замкнут, и на конденсаторе фиксируется начальное нулевое напряжение. При размыкании ключа в момент  $t = 0$  начинается заряд конденсатора от источника  $E_0$  через зарядный резистор  $R$ . Напряжение на конденсаторе нарастает по закону



$$U_c(t) = E_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (19)$$

Если в момент времени  $t = T$ , когда напряжение на конденсаторе достигает некоторого заданного уровня  $U_a$ , ключ замкнуть, то напряжение мгновенно упадет до нуля. Таким образом, сформировано напряжение, подобное напряжению ждущей развертки с амплитудой  $U_a$  и длительностью  $T$ .

Рис. 23. Генератор развертки на  $RC$ -цепочке

Скорость развертки, вычисленная для момента  $t = 0$ , будет

$$\left. \frac{dU_c(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E_0}{RC}. \quad (20)$$

Изменяя постоянную времени  $\tau = RC$ , можно в широких пределах регулировать скорость (а значит, и длительность) развертки.

Заметим, что скорость на протяжении развертки не остается постоянной, т. е. развертка нелинейна, однако она тем ближе к линейной, чем меньше ее амплитуда по сравнению с зарядным напряжением.

Известно, что мгновенная скорость изменения напряжения на конденсаторе определяется мгновенным значением зарядного тока, текущего через конденсатор:

$$\frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t).$$

Зарядный ток максимален в начале заряда, когда падение напряжения на  $R$  максимальное:

$$i_{\max} = i(0) = \frac{E_0}{R}. \quad (21)$$

К моменту времени  $t = T$  падение напряжения на  $R$  уменьшается на величину  $U_a$ . Поэтому

$$i_{\min} = i(T) = \frac{E_0 - U_a}{R}.$$

Максимальная и минимальная скорости соответственно будут

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{\max} = \frac{E_0}{RC}, \quad \left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{\min} = \frac{E_0 - U_a}{RC}, \quad (22)$$

а нелинейность развертки

$$\delta_{\text{нел}} = \frac{\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{\max} \cdot \left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{\min}}{\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_{\max}^2} = \frac{U_a}{E_0} \quad (23)$$

Итак, нелинейность развертки численно равна той доле, которую составляет амплитуда развертки  $U_a$  от опорного напряжения  $E_0$  и не зависит ни от чего другого. Получение достаточно малой нелинейности развертки возможно лишь при «плохом» использовании опорного напряжения. Так обстоит дело в генераторе развертки на основе простой  $RC$ -цепочки. Усложнением схемы генератора можно добиться существенного улучшения линейности, или, что то же, лучшего использования опорного напряжения.

Известны два основных метода линеаризации заряда конденсатора.

Первый метод состоит в замене резистора  $R$  некоторым нелинейным двухполюсником (рис. 24, а), вольт-амперная характеристика которого имеет участок, где ток слабо зависит от напряжения (рис. 24, б). Как видно из рисунка, разница между максимальным зарядным током  $i(0)$  и минимальным  $i(T)$  невелика, несмотря на то, что амплитуда  $U_a$  составляет значительную долю опорного напряжения  $E_0$ .

Сущность второго метода заключается в том, что с помощью обратной связи поддерживается неизменной разность потенциалов на зарядном резисторе  $R$ , а следовательно, и ток через него. Эта идея может быть осуществлена применением как положительной, так и отрицательной обратной связи.

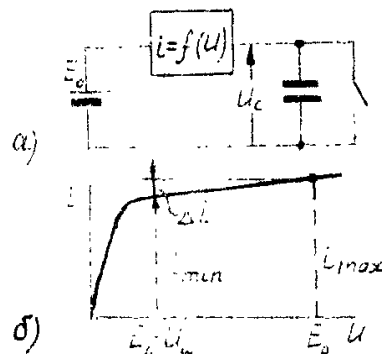


Рис. 24. Генератор развертки с нелинейным двухполюсником

В схеме рис. 25 использована положительная обратная связь. Нарастание напряжения на емкости  $U_c(t)$  передается через цепь обратной связи в точку А.

Потенциал точки А, первоначально равный  $E_0'$ , изменяется по закону

$$U_A(t) = E_0' + KU_c(t),$$

где  $K$  — коэффициент передачи цепи обратной связи. Зарядный ток

$$i_c(t) = \frac{U_A(t) - U_c(t)}{R} = \frac{E_0' + KU_c(t) - U_c(t)}{R}.$$

Нетрудно видеть, что при  $K=1$  зарядный ток не зависит от времени, следовательно, напряжение на конденсаторе растет строго линейно.

Вспомогательный резистор  $R'$  служит для того, чтобы выход цепи обратной связи не замыкался на источник  $E_0$ .

Недостатком этой схемы являются жесткие требования к стабильности коэффициента:  $K=1$ .

В схеме рис. 26, а зарядный конденсатор  $C$  включен в качестве цепи отрицательной обратной связи в усилителе с большим коэффициентом усиления  $-K$  (знак минус означает изменение полярности сигнала в усилителе).

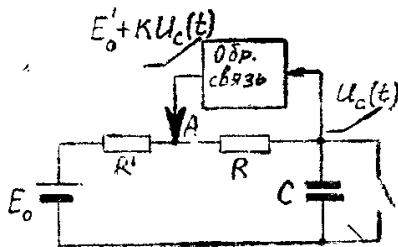


Рис. 25. Генератор развертки с линеаризирующей положительной обратной связью

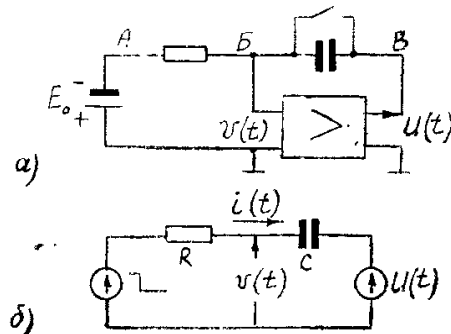


Рис. 26. Генератор развертки на операционном интеграторе: а — блок-схема; б — эквивалентная схема

При размыкании ключа Кл конденсатор  $C$  начинает заряжаться от источника  $E_0$  через резистор  $R$  и выходное сопротивление усилителя. Потенциал в точке Б стремится повыситься (при указанной полярности источника  $E_0$ ). Понижение потенциала точки Б является входным сигналом усилителя. На его выходе, в точке В, потенциал повышается. Это повышение по цепи обратной связи через конденсатор  $C$  подается обратно в точку Б, противодействуя понижению ее потенциала. Анализ показывает, что изменение потенциала точки Б получается очень малым. Следовательно, разность потенциалов на концах резистора  $R$  практически неизменна

В течение всего процесса заряда, значит, почти неизменна и скорость нарастания напряжения на конденсаторе.

Проведем математический анализ работы схемы (рис. 26, а), используя ее эквивалент (рис. 26, б). Здесь введем источник скачка

$$E(t) = -E_0 \cdot 1(t), \quad (24)$$

эквивалентный опорному напряжению  $-E_0$  и эффекту размыкания ключа. Входное сопротивление усилителя предполагается бесконечно большим, поэтому оно отсутствует на эквивалентной схеме. Выходной сигнал усилителя представлен управляемым источником

$$u(t) = -Kv(t) \quad (25)$$

с нулевым выходным сопротивлением.

Через сопротивление  $R$  течет ток

$$i(t) = \frac{E(t) - v(t)}{R}, \quad (26)$$

этот же ток протекает и через емкость  $C$ . Поэтому

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} = C \frac{d}{dt} [v(t) - u(t)]. \quad (27)$$

Приравнявая (26) и (27) и выражая  $u(t)$  через  $v(t)$  (25), получаем

$$v(t) + (K+1)RC \frac{dv(t)}{dt} = E(t). \quad (28)$$

Учитывая (24) и (25), получаем дифференциальное уравнение для выходного напряжения:

$$u(t) + (K+1)RC \frac{du(t)}{dt} = KE_0 1(t). \quad (29)$$

Решением этого уравнения является экспонента:

$$u(t) = KE_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right), \quad (30)$$

где введено обозначение эффективной постоянной времени

$$\tau_0 = (K+1)RC. \quad (31)$$

По сравнению с процессом заряда емкости в простой  $RC$ -цепочке опорное напряжение как бы увеличилось в  $K$  раз, а постоянная времени в  $K+1$  раз.

Скорость нарастания при  $t=0$

$$\left. \frac{dU_c}{dt} \right|_{t=0} = \frac{KE_0}{\tau_0} = \frac{K}{K+1} \frac{E_0}{RC} \approx \frac{E_0}{RC} \quad (32)$$

оказалась практически такой же, как в  $RC$  — схеме (см. рис. 24), но сохраняется почти неизменной на все время прямого хода (рис. 27). Существенным достоинством схемы является то, что скорость практически не зависит от коэффициента усиления  $K$ , который может оказаться нестабильным, а целиком определяется ста-

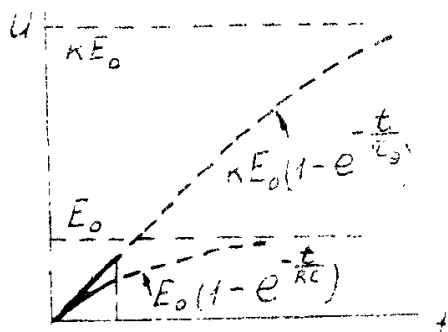


Рис. 27. К сравнению линейности разверток в  $RC$ -цепочке и в схеме генератора развертки на операционном интеграторе

бильными параметрами: опорным напряжением  $E_0$  и пассивными элементами  $R$  и  $C$ .

Из анализа работы схемы видно, что к усилителю предъявляется ряд требований: большой коэффициент усиления (не обязательно стабильный), большое входное и малое выходное сопротивления. Этим требованиям отвечают так называемые операционные усилители, широко применяемые в схемах автоматики и вычислительной техники. Операционный усилитель, охваченный емкостной обратной связью, при подаче

входного сигнала через резистор выполняет в сущности операцию интегрирования\*, поэтому его часто называют операционным интегратором или интегратором Миллера.

## ЖДУЩИЙ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМЫ. СИНХРОНИЗАЦИЯ

Рассмотрим принцип получения двух основных режимов генератора развертки: ждущего и автоколебательного. Дело сводится к двум режимам управления электронным ключом, замыкающим зарядный конденсатор  $C$  в генераторе развертки.

На рис. 28 электронный ключ состоит из двух диодов, соединенных к концам зарядного конденсатора. В среднюю точку подано напряжение от управляющего триггера. Триггер имеет два устойчивых состояния. Соответственно этому его выходное напряжение может иметь либо «высокий» уровень, либо «низкий». В данном случае «высокий» уровень выбран около нуля, а «низкий» — отрицательный потенциал порядка нескольких вольт. Когда в среднюю точку диодов подается нулевой потенциал, диоды открыты, и конденсатор оказывается практически замкнутым коротко. На входе и выходе операционного усилителя фиксируется начальный нулевой потенциал. В режиме ждущей развертки (рис. 29) это исходное состояние схемы. Приходящий импульс запуска (а) опрокидывает триггер во второе состояние (б). Потенциал средней точки диодов скачком падает. Диоды оказываются запертыми, ключ разомкнут, и конденсатор  $C$  начинает заряжаться. Напряжение на выходе усилителя нарастает по линейному закону (в) —

\* В нашем случае линейно-нарастающее напряжение есть не что иное, как интеграл от скачка напряжения.



формируется прямой ход развертки. Нарастающее напряжение подается на вход специальной схемы срыва, работающей так, что пока входное напряжение меньше некоторой заданной величины  $U_a$ , на выходе схемы срыва сигнала нет. Как только напряжение  $U_a$  достигнуто, на выходе схемы возникает импульс (г), вызывающий возвращение триггера в исходное состояние, при котором ключ вновь замыкается. На этом работа схемы заканчивается, и генератор «ждет» прихода следующего запускающего импульса.

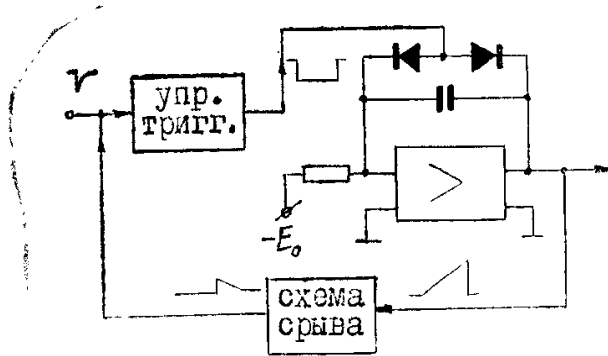


Рис. 28. Функциональная схема генератора ждущей и автоколебательной развертки

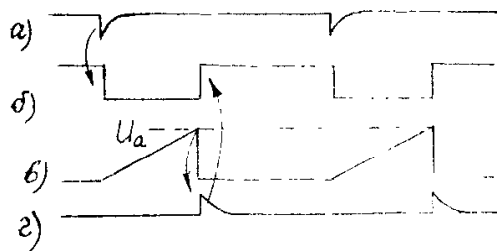


Рис. 29. Эпюры напряжений в режиме ждущей развертки: а — импульсы запуска; б — выход управляющего триггера; в — напряжение развертки; г — выход схемы срыва

В режиме автоколебательной развертки генератор должен работать периодически, без внешнего импульса запуска. Схема генератора развертки остается почти той же, изменяются лишь некоторые режимы и форма напряжения. Рассмотрим один из вариантов получения автоколебательного режима в схеме рис. 28. Схема триггера выбирается такой, чтобы его опрокидывание вызывалось не только подачей импульсов, но и медленным изменением потенциала  $U_{вх}$  на его входе (так называемый триггер Шмидта). Пусть  $U_0$  — некоторое пороговое значение, такое, что при  $U_{вх} \leq U_0$  триггер обязательно находится в состоянии, размыкающем ключ. Начальный уровень на выходе схемы срыва (а значит, на входе триггера) выбирается ниже  $U_0$ , так что триггер опрокинут и ключ разомкнут (рис. 30). При этом конденсатор заряжается и напряжение на выходе усилителя нарастает — идет прямой ход развертки. Как только это напряжение доходит до  $U_a$ , происходит срабатывание схемы срыва, и на ее выходе появляется положительный фронт, вызывающий переборс триггера. Ключ замыкается, конденсатор разряжа-

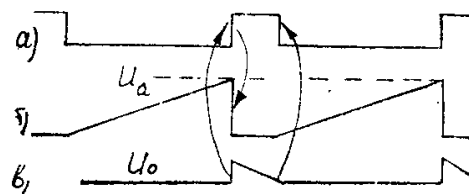


Рис. 30. Эпюры напряжений в режиме автоколебательной развертки: а — выход триггера; б — развертка; в — выход схемы срыва (вход триггера)

ется, тем самым формируется обратный ход развертки. Однако на этом процесс не заканчивается. Напряжение на выходе схемы срыва после положительного фронта начинает более медленно спадать, стремясь к исходному значению. Как только напряжение спадает до порогового значения  $U_0$ , триггер вновь опрокидывается, размыкая ключ. Процесс периодически повторяется. Выходное напряжение генератора развертки имеет форму «зубцов пилы», разделенных небольшими паузами, позволяющими легко синхронизировать частоту автоколебательной развертки подачей внешних сигналов.

Рассмотрим механизм синхронизации на следующем примере (рис. 31). Пусть частоты сигнала (рис. 31, а) и развертки (рис. 31, б)

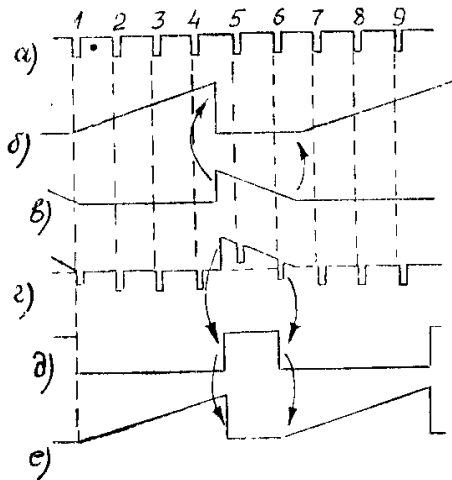


Рис. 31. К пояснению механизма синхронизации:

а — синхронизирующие импульсы; б, в — развертка и вход триггера в отсутствие синхронизации; г — вход триггера при подаче синхронизирующих импульсов; д, е — выход триггера и развертки в режиме синхронизации

некратны: период развертки, равный суммарной длительности прямого хода и паузы, больше пяти, но меньше шести периодов сигнала. При этом осциллограмма неустойчива, она «бежит». Требуется засинхронизовать развертку сигналом так, чтобы период развертки оказался кратным периоду сигнала. С этой целью синхронизирующий сигнал подается на вход триггера совместно с выходным напряжением схемы срыва (рис. 31, г). Как уже отмечалось, импульс отрицательной полярности может вызвать опрокидывание триггера в состояние, размыкающее ключ, если импульс пересекает пороговый уровень  $U_0$ . Нетрудно видеть, что импульсы 1—4 (рис. 31), не оказывают никакого действия: триггер уже опрокинут и ключ разомкнут. Прямой ход развертки формируется так же, как и

в отсутствие синхронизирующих импульсов. Скорость развертки и ее длительность по-прежнему определяются собственными параметрами генератора развертки. Прямой ход заканчивается где-то между четвертым и пятым импульсом. Положительный фронт, появляющийся на выходе схемы срыва, опрокидывает триггер. Ключ замыкается. Начинается спад напряжения на входе триггера. Обратное опрокидывание триггера происходит в момент поступления импульса 6, пересекающего пороговый уровень  $U_0$ . Таким образом, за счет сокращения паузы период развертки стал равным точно пяти периодам сигнала. Нетрудно видеть, что при несколько большей амплитуде импульсов опрокидывание триггера могло произойти от импульса 5, но и в этом случае период развертки был бы кратен периоду сигнала.

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА РАЗВЕРТКИ

Пример практической схемы генератора развертки дан на рис. 32 (несколько упрощенная схема генератора развертки осциллографа С1-68). В схеме можно выделить следующие основные части:

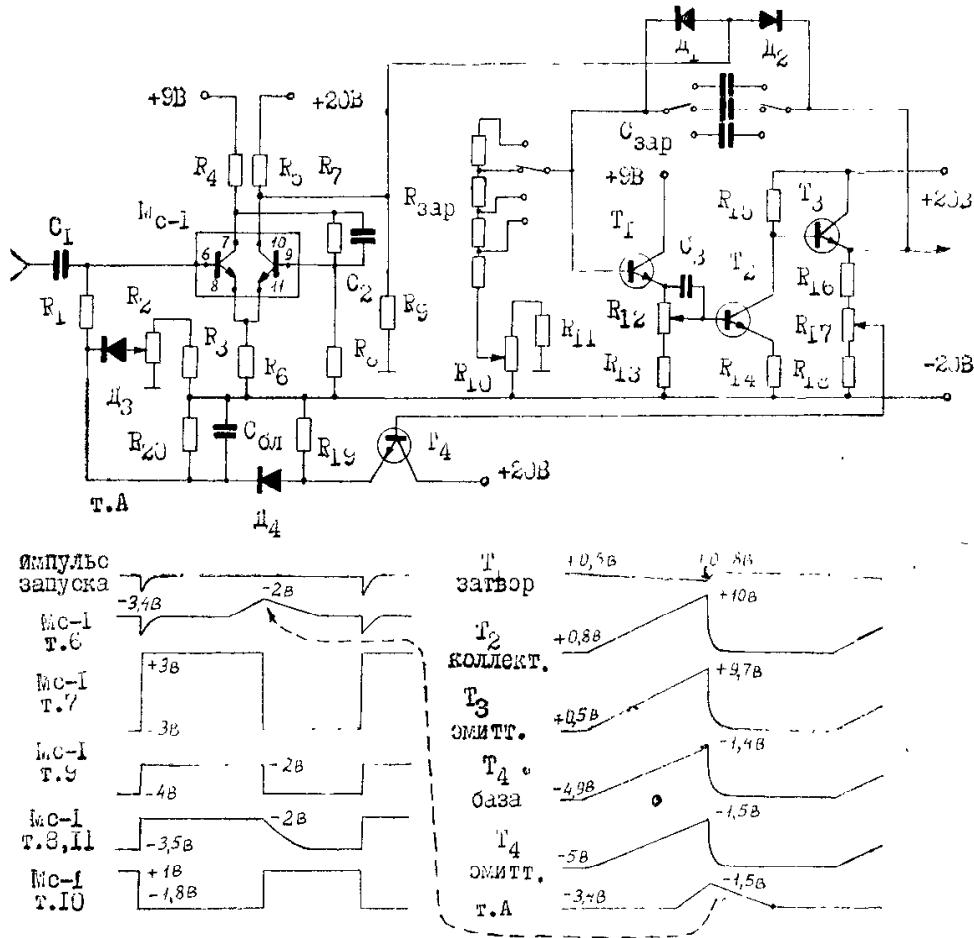


Рис. 32. Принципиальная схема генератора развертки осциллографа С1-68 (схема упрощена) и эшоры напряжений

1. Триггер, управляющий электронным ключом, собранный на микросхеме Ms-1 типа 2НТ172 (1/2).
2. Электронный ключ (диоды  $D_1$  и  $D_2$ ).
3. Генератор линейно-нарастающего напряжения, включающий в себя усилитель на транзисторах  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и наборы зарядных резисторов  $R_{зар}$  и конденсаторов  $C_{зар}$ .
4. Схема срыва и блокировки входа ( $T_4$  и  $D_4$ ).

Управляющий триггер, собранный по схеме триггера Шмидта с одним управляющим входом (точка 6 Ms-1), имеет два устойчивых состояния: либо открыт левый транзистор, и тогда закрыт правый, либо наоборот, закрыт левый и открыт правый транзистор.

В режиме ждущей развертки исходным является состояние, при котором открыт левый транзистор и закрыт правый. Это обеспечи-

баются следующим образом. Начальный потенциал базы левого транзистора (точка 6) устанавливается несколько выше порогового уровня  $U_0$  (в данном случае начальный потенциал равен  $-3,4$  В). Этот уровень определяется положением потенциометра  $R_2$ . Как видно из эюр, приведенных на рис. 30, начальный потенциал эмиттера (точка 8) равен  $-3,5$  В, т. е. ниже потенциала базы, поэтому течет ток базы, вызывающий коллекторный ток левого транзистора. Коллекторный ток создает большое падение напряжения на коллекторной нагрузке  $R_4$ , и потенциал коллектора (точка 7) низкий — составляет  $-3$  В. Благодаря делителю  $R_7, R_8$  на базе правого транзистора (точка 9) устанавливается тоже низкий потенциал. Делитель подобран так, чтобы потенциал базы оказался ниже потенциала эмиттера (точка 11). Как видно из эюр, эти потенциалы таковы: на базе  $-4$  В, на эмиттере  $-3,5$  В. Отрицательное смещение запирает правый транзистор. Коллекторный ток не течет. Делитель  $R_5, R_9$  подобран так, что в отсутствие коллекторного тока потенциал средней точки диодов  $D_1, D_2$  оказывается положительным  $+1$  В (Мс-1, точка 10). Диоды открыты, это значит, что ключ замкнут. Таково исходное состояние.

Отрицательный импульс запуска приходит на базу левого транзистора (точка 6). Транзистор запирается, и в его коллекторе образуется положительный фронт. Потенциал подскакивает до уровня  $+3$  В. Через делитель  $R_7, R_8$  (а также конденсатор  $C_2$ ) повышение потенциала передается на базу правого транзистора, вызывая отпирание его. Теперь течет коллекторный ток в правом транзисторе. Это вызывает отрицательный скачок (от  $+1$  В до  $-1,8$  В) в коллекторе (Мс-1, точка 10) и положительный скачок (от  $-3,5$  В до  $-2$  В) в эмиттере (Мс-1, точка 11). Теперь левый транзистор не может отпереться, даже когда закончится импульс запуска, так как исходный потенциал его базы ( $-3,4$  В) оказывается ниже потенциала эмиттера. Как видим, в схеме триггера Шмидта, когда открыт левый транзистор, он удерживает в запертом состоянии правый транзистор по цепи делителя  $R_7, R_8$ . Когда же открыт правый транзистор, то он удерживает в запертом состоянии левый транзистор по цепи общих эмиттеров.

Отрицательный потенциал ( $-1,8$  В) в точке 10 запирает диоды  $D_1$  и  $D_2$ , т. е. размыкает ключ. Начинается процесс заряда конденсатора  $C_{зар}$ . Опорным является отрицательное напряжение, снимаемое с движка потенциометра  $R_{10}$  (плавная регулировка скорости развертки). Напряжение на левой обкладке зарядного конденсатора начинает понижаться. Однако понижение очень мало из-за действия отрицательной обратной связи, как это было описано выше. Как видно из эюры ( $T_1$ , затвор), напряжение меняется от  $+0,5$  В до  $+0,48$  В.

Усилитель состоит из трех каскадов с гальваническими межкаскадными связями. На входе стоит истоковый повторитель на полевом транзисторе  $T_1$ . Этот каскад обеспечивает большое входное сопротивление усилителя. Второй каскад — усилитель напряжения.

Сопротивление резистора  $R_{15}$  в цепи коллектора выбрано много больше сопротивления в эмиттере  $R_{14}$ . Поэтому каскад дает большое усиление (порядка нескольких сотен). Малое выходное сопротивление усилителя обеспечивается эмиттерным повторителем на транзисторе  $T_3$ . Эюры напряжений (затвор  $T_1$ , коллектор  $T_2$ , эмиттер  $T_3$ ) дают представление о режиме и усилении усилителя. С помощью режимной регулировки  $R_{12}$  можно устанавливать исходный потенциал на выходе усилителя. С эмиттера  $T_3$  снимается напряжение развертки, поступающее далее на усилитель канала  $X$  и на горизонтально отклоняющие пластины. С движка потенциометра  $R_{17}$  нарастающее напряжение подается также на вход схемы срыва и блокировки входа (база  $T_4$ ). Транзистор  $T_4$  включен по схеме эмиттерного повторителя — напряжение на его эмиттере повторяет (с некоторым снижением уровней) напряжение на базе. На выход схемы срыва проходит только «верхушка» нарастающего напряжения. Это обеспечивается диодом  $D_4$ , который нормально заперт. «Верхушка» через  $R_1$  поступает на вход триггера. В момент времени, когда в точке  $A$  напряжение поднимается до уровня — 1,5 В, левый транзистор триггера отпирается, а правый запирается. Ключ замыкается, а напряжение развертки резко обрывается.

В схеме предусмотрена блокировка входа на некоторое время после возвращения триггера в исходное состояние. Смысл этого вот в чем. После скачка, соответствующего обратному ходу развертки, в цепях всей схемы идут переходные процессы. Если сразу после обратного хода придет новый импульс запуска и запустит генератор ждущей развертки, то работа начнется при начальных условиях, несколько отличающихся от прежних. Это приведет к неустойчивой работе развертки. Для предотвращения этого нужно сделать вход триггера на некоторое время нечувствительным к возможному запуску — это и есть блокировка входа. Для блокировки входа выходная часть схемы срыва построена так, что положительный импульс в точке  $A$  несколько «затянут». Его спад не повторяет спада обратного хода развертки, а длится дольше. Затягивание определяется постоянной времени  $R_{20}C_{6л}$ .

В течение интервала блокировки напряжение, поступающее из схемы срыва на базу транзистора, превышает напряжение на его эмиттере. Транзистор находится в режиме насыщения. Если в это время поступит отрицательный запускающий импульс, он не сможет преодолеть насыщения и запереть транзистор. Блокировка оканчивается в тот момент, когда диод  $D_1$  отпирается, и в точке  $A$  фиксируется исходное напряжение — 3,4 В, задаваемое потенциалом движка  $R_2$ .

Схема легко переводится в режим автоколебаний. Для этого нужно опустить движок  $R_2$  в более низкое положение. Тогда разряд блокировочного конденсатора  $C_{6л}$  не заканчивается фиксацией уровня — 3,4 В, а идет до тех пор, пока не будет достигнут порог запирающего левого транзистора триггера. Процесс генерирования развертки будет продолжаться периодически.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как формируется луч в ЭЛТ? От чего зависит его яркость, фокусировка?
2. Чем определяется чувствительность ЭЛТ? В чем состоит идея «послеускорения»?
3. Почему и при каких условиях получается «бегущая» осциллограмма?
4. Почему и при каких условиях на осциллограмме могут наблюдаться двойные линии?
5. Как обеспечивается запуск ждущей развертки, опережающий наблюдаемый сигнал?
6. Перечислите основные режимы развертки и основные режимы запуска (синхронизации).
7. Нарисуйте (на память) функциональную схему осциллографа с указанием взаимодействия узлов, коммутацией режимов, с органами регулировок.
8. Перечислите основные причины, по которым форма наблюдаемого на экране изображения может отличаться от формы исследуемого сигнала.
9. Каковы особенности построения усилителя вертикального канала для режима работы с открытым входом?
10. Нарисуйте схему балансного (двухтактного) каскада и укажите, чем определяется ООС по режиму и по сигналу?
11. Объясните принцип работы двухтактного усилителя при однитактной подаче сигнала.
12. Зачем во входном делителе нужны конденсаторы? В чем преимущества делителя на П-образных звеньях перед простым делителем?
13. Каковы основные требования к входному каскаду? Опишите по схеме работу входного каскада.
14. Объясните работу предварительного и оконечного усилителей по принципиальной схеме, роль отдельных элементов схемы.
15. Что такое нелинейность развертки и от чего она зависит?
16. Каковы методы линеаризации напряжения развертки?
17. Нарисуйте блок-схему генератора развертки на операционном интеграторе и дайте математическое описание процессов в нем. Как зависит скорость развертки от усиления операционного усилителя?
18. Объясните механизм синхронизации автоколебательной развертки.
19. По принципиальной схеме и эпюрам напряжений поясните работу генератора развертки осциллографа С1-68 в режиме ждущей и автоколебательной развертки.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение . . . . .  | 3  |
| Электроннолучевая трубка (ЭЛТ) . . . . .  | 4  |
| Осциллограмма . . . . .   | 8  |
| Функциональная схема осциллографа . . . . .                                     | 16 |
| Блок вертикального отклонения . . . . .   | 16 |
| Блок горизонтального отклонения . . . . .                                       | 20 |
| Блок управления яркостью луча . . . . .   | 21 |
| Работа с осциллографом . . . . .  | 23 |
| Канал вертикального отклонения. Проблема стабилизации . . . . .                 | 25 |
| Входная цепь . . . . .  | 31 |
| Предварительный и оконечный усилители . . . . .                                 | 34 |
| Генератор развертки. Методы получения линейно-нарастающего напряжения . . . . . | 36 |
| Ждущий и автоколебательный режимы. Синхронизация . . . . .                      | 40 |
| Принципиальная схема генератора развертки . . . . .                             | 43 |
| Контрольные вопросы . . . . .   | 46 |

*Юрий Владимирович Тронин*

### ОСЦИЛЛОГРАФ

Редактор *Е. Г. Ремнева*

Техн. редактор *К. П. Барановская*

---

Л 79770 21/IV-77 г.

3,5 уч.-изд. л. 3 печ. л.

Заказ 122/8180

Цена 12 коп.

Тираж 1500

---

Типография МАИ