

нием на входе прибора опорного импульса зажигается пусковой тиратрон (схема пуска), от которого срабатывает одновибратор импульса подсвета трубки. Сформированный одновибратором импульс одновременно с отпиранием трубки запускает генератор радиальной развертки, вырабатывающий линейно убывающее напряжение. Последнее подается на конический электрод трубки и вызывает напряжение луча от периферии трубки к ее центру, в результате чего получается спиральная развертка.

Опорный импульс через линию задержки поступает на конический электрод, вызывая радиальное отклонение луча. К моменту подачи на вход прибора интервального импульса, запаздывающего по отношению к опорному на измеряемый промежуток времени Δt , луч успевает пройти некоторую часть спирали. По количеству полных витков и части неполного витка, разделяющих импульсы, можно определить временной интервал.

Для повышения точности и удобства измерения на спираль наносятся метки времени. Они создаются специальным генератором меток с кварцевой стабилизацией и представляют собой короткие импульсы небольшой амплитуды, следующие с определенным интервалом (0,2 мксек). Импульсы подаются в цепь второго анода трубки, соединенного с внутренним коническим электродом, и вызывают небольшое отклонение луча в радиальном направлении. Частота меток выбрана кратной частоте круговой развертки. Вследствие этого метки разбивают окружность на целое число частей и располагаются по радиусу, так что они выделяются на фоне исследуемых сигналов.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА В ЧИСЛО ИМПУЛЬСОВ

В современной радиоэлектронике используются непрерывные и дискретные сигналы. Преобразование непрерывных величин, иначе называемых аналоговыми, в дискретные является основой для построения измерительных приборов с цифровым отсчетом. Сущность преобразования временного интервала Δt , представляющего собой непрерывную величину, в дискретную форму заключается в преобразовании его в число импульсов, однозначно соответствующее величине Δt . Это число фиксируется счетчиком, снабженным системой цифрового отсчета. Поэтому метод преобразования временного интервала в число импульсов называют также методом дискретного счета. Схемы преобразования весьма многообразны, но в большинстве из них встречается аналогичные типовые устройства: триггеры, временные селекторы, сравнивающие устройства, генераторы пилообразного напряжения, счетчики импульсов и др.

В связи с этим сначала мы рассмотрим типовые элементы, применяемые в схемах преобразования и счета, а затем уже перейдем к изложению сущности метода.

7. ТРИГГЕРЫ

Триггер представляет собой электронное устройство, обладающее двумя состояниями устойчивого равновесия. Триггеры весьма многообразны. Они могут быть выполнены на электронных лампах, тиратронах, транзисторах, туннельных диодах, магнитных элементах.

Триггеры имеют два выхода. Если схема выполнена на лампах, то выходами служат аноды двух ламп. Вход триггера определяется неоднозначно и зависит от способа подачи сигналов запуска. В ламповом триггере входами чаще всего служат сетки ламп; при этом триггер имеет два входа. Возможен случай, когда у триггера только один вход; сигнал, переключающий триггер, подается на обе сетки сразу. Такой вход называют счетным.

Независимо от вида конкретной схемы триггер удобно изображать в виде прямоугольника, разделенного на две части, соответствующие двум ветвям схемы. Часть (половина) прямоугольника, через которую в данном состоянии триггера протекает ток, условно штрихуется (рис. 14).

Условимся обозначать два возможных состояния устойчивого равновесия триггера цифрами 0 и 1. Цифра 0 соответствует состоянию, при котором на выходе триггера создается низкий по абсолютной величине потенциал (рис. 14,а). Противоположному состоянию (когда на выходе высокий потенциал) соответствует цифра 1 (рис. 14,б).

Ламповые триггеры. Две принципиальные схемы симметричного лампового триггера приведены на рис. 15. Импульсы запуска можно подавать на сетку одного из триодов: положитель-

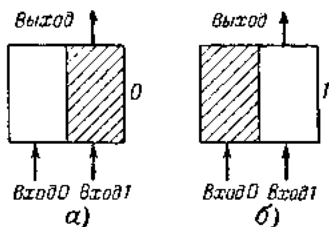


Рис. 14. Условные изображения триггеров.

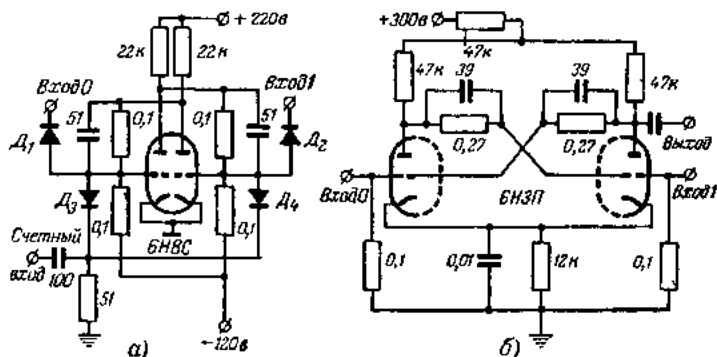


Рис. 15. Ламповые триггеры.

ные — на сетку запятого или отрицательные — на сетку отпертого триода. Другим вариантом является подача запускающих импульсов отрицательной полярности одновременно на сетки обоих триодов (на счетный вход). В некоторых случаях импульсы подают на катоды триодов или на аноды их через разделительные дюды.

Способ подачи импульсов запуска на сетку (или анод) одного из триодов оказывается удобным, когда следующие друг за другом импульсы имеют чередующиеся полярности и переключение триггера должно происходить при подаче каждого импульса. Такой вариант переключения триггера используется

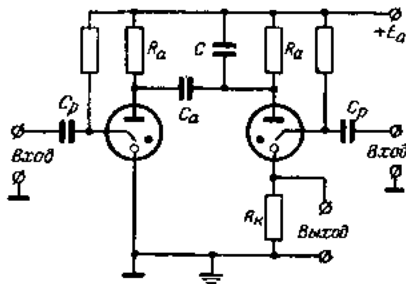


Рис. 16. Схема триггера на триодах с холодным катодом.

в приборе, измеряющем временной интервал, задаваемый опорным и интервальным импульсами, поступающими от различных источников.

В электронных вычислительных устройствах, счетчиках числа импульсов и других приборах широко используются триггеры, переключение которых осуществляется в результате поступления однополярных отрицательных импульсов на счетный вход. В этом случае каждый новый импульс запуска вызывает очередное переключение триггера.

На рис. 15,а показана типовая триггерная ячейка с внешним источником сеточного смещения, применяемая в счетных схемах. Часто используются и триггеры с автоматическим смещением (рис. 15,б). Сравнивая обе схемы, к достоинствам первой следует отнести малую зависимость напряжения на сетках отпертых триодов от параметров триода. Кроме того, эта схема состоит из меньшего количества деталей, чем схема с автоматическим смещением. Последняя же обладает тем преимуществом, что позволяет обойтись без дополнительного источника сеточного смещения: отрицательное смещение на сетки ламп снимается с сопротивления (12 ком), включенного в общую катодную цепь ламп. Если схема триггера симметрична, то сумма анодных токов обоих триодов остается все время практически постоянной и напряжение отрицательного смещения не изменяется.

Важным достоинством схемы триггера с автоматическим смещением по сравнению со схемой с отдельным источником

является ее малая чувствительность к изменению питающих напряжений. Кроме того, эта схема позволяет подавать управляющие импульсы на катоды ламп, чем достигается развязка от источника управляющих сигналов и повышается чувствительность триггера к импульсам положительной полярности.

Триггеры на тиратронах с холодным катодом. На рис. 16 показана схема триггера с общей емкостью между анодами двух тиратронов. Работа такого триггера заключается в следующем.

Предположим, что триггер находится в состоянии равновесия, при котором левый (по схеме) тиратрон погашен, а правый горит. Для переключения триггера необходимо подать на пусковой электрод левого тиратрона положительный импульс, амплитуда которого достаточна для зажигания тиратрона. При зажигании напряжение анода левого тиратрона падает и на анод правого тиратрона через конденсатор C_a поступает отрицательный импульс, который гасит этот тиратрон. Триггер переходит во второе устойчивое положение. Новое переключение триггера возможно при подаче положительного импульса на пусковой электрод погашенного тиратрона.

Выходное напряжение снимается с небольшого сопротивления R_k , включенного в цепь катода правого тиратрона. Поэтому на выходе триггера появляется напряжение лишь тогда, когда правый тиратрон отперт (горит). При запираии тиратрона оно падает до нуля.

Для увеличения амплитуды выходного импульса параллельно анодному сопротивлению R_a тиратрона включен конденсатор C , который шунтирует сопротивление в момент зажигания тиратрона. В этот момент амплитуда выходного импульса определяется соотношением

$$U_{\text{вых}} = E_a \frac{R_k}{R_k + R_o}, \quad (11)$$

где E_a — напряжение питания;

R_o — сопротивление отпертого тиратрона.

После зажигания тиратрона начинаются процессы заряда конденсатора C и перезаряда конденсатора C_a . Когда эти процессы завершаются, амплитуда импульса, снимаемого с сопротивления R_k , уменьшается до величины

$$U'_{\text{вых}} = E_a \frac{R_k}{R_a + R_o + R_k}. \quad (12)$$

Такой триггер позволяет получать выходные импульсы с крутизной фронта 1—3 мксек. Снижение разрешающего времени триггера ограничивается временем деионизации тиратрона и постоянной времени перезаряда конденсатора C_a , которая приближенно может быть определена по формуле

$$\tau_a = C_a \left(R_a + \frac{R_a R_o}{R_a + R_o} \right). \quad (13)$$

Следует иметь в виду, что уменьшение емкости конденсатора C_a влечет за собой уменьшение амплитуды и длительности гасящего импульса, передаваемого с анода запертого тиратрона

на анод отпертого. Если длительность этого импульса окажется меньше времени деионизации тиратрона, то последний не погаснет и оба тиратрона будут находиться в проводящем состоянии. Нельзя выбирать ниже определенной величины и сопротивление R_a , так как ток, протекающий через тиратрон, может оказаться выше тока гашения и тиратрон не погаснет.

Триггеры на транзисторах. Наибольшее практическое применение получили триггеры на двух плоскостных транзисторах. Их

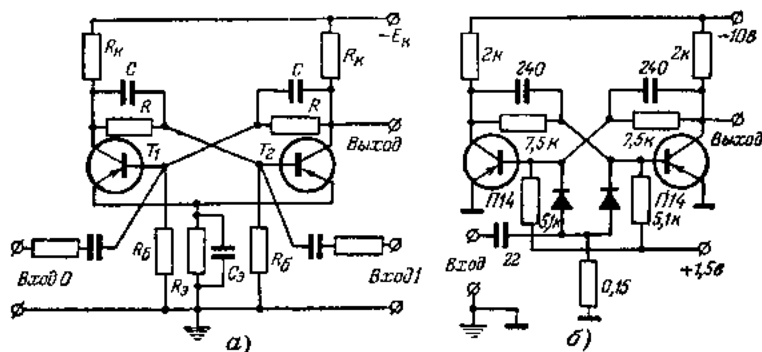


Рис. 17. Триггеры на транзисторах.

схемы и принцип работы аналогичны триггерам на электронных лампах.

На рис. 17, а изображена схема триггера на транзисторах с автоматическим смещением. Устойчивое состояние такой схемы, так же как и ламповой, характеризуется тем, что если один транзистор отперт, то другой заперт. Переброс триггера достигается подачей положительного импульса на базу отпертого транзистора.

Пусть схема находится в состоянии 0 (правый транзистор отперт). Подадим на вход 1 положительный импульс, запирающий транзистор T_2 . Потенциал коллектора этого транзистора понизится. Отрицательный перепад коллекторного напряжения передается на базу транзистора T_1 . Это приведет к увеличению коллекторного тока транзистора T_1 и повышению потенциала его коллектора. Образующийся положительный перепад передается на базу транзистора T_2 , что будет поддерживать транзистор в запертом состоянии. Чтобы вновь перебросить триггер, нужно подать положительный импульс на вход 0.

На рис. 17, б приведена схема триггера на транзисторах с внешним источником питания и счетным входом. Схемы, аналогичные показанным на рис. 17, могут быть выполнены как на транзисторах с проводимостью типа $p-n-p$, так и на транзисторах с проводимостью типа $n-p-n$.

Для нормальной работы триггера необходимо соблюдать определенные соотношения между величинами элементов схемы. Сопротивления коллекторной нагрузки R_k должны быть су-

щественно меньше сопротивлений коллекторно-базовых связей R . При выборе их придерживаются соотношения $R \gg (4 \div 5)R_n$. Сопротивления в цепи базы R_b и коллекторно-базовых связей R должны быть значительно меньше обратного сопротивления эмиттер—база запятого транзистора. Параметры элементов цепочки автоматического смещения R_3C_3 выбирают из такого расчета, чтобы ее постоянная времени $\tau_3 = R_3C_3$ намного превышала продолжительность переходных процессов триггера.

Емкости коллекторно-базовых конденсаторов C необходимо иметь такие, чтобы напряжения на них практически сохранялись неизменными, пока длится процесс переключения. В то же время эти конденсаторы должны успевать перезаряжаться в интервале между двумя соседними переключениями триггера. Последнее условие обеспечивается при выполнении соотношения

$$(4 \div 5) C \frac{RR_b}{R + R_b} \leq \frac{1}{F_{\max}} = T_p, \quad (14)$$

где F_{\max} — максимальная частота переключений триггера;

T_p — разрешающее время триггера.

Работа транзистора в схеме триггера, как и в других ключевых схемах, заключается в переходах от запятого состояния к режиму насыщения в открытом положении и затем от режима насыщения к запятому состоянию. Режим насыщения наступает при некотором значении тока базы, когда количество неосновных носителей заряда, инжектированных из эмиттера в базу (дырок в случае p - n - p -транзистора), превосходит количество носителей того же знака, проходящих в коллектор. В этом случае ток коллектора не зависит от тока базы, т. е. управляющее действие базы теряется. Величина коллекторного тока ограничивается сопротивлением нагрузки R_n , включенным в цепь коллектора. Таким образом, в области базы накапливается большое количество неосновных носителей, т. е. наступает режим насыщения. Если частота переключений триггера сравнительно невелика, то состояние насыщения не является помехой для нормальной работы.

При построении схем для измерения малых временных интервалов и счетчиков импульсов с высокой скоростью счета необходимы триггеры с малым разрешающим временем. Принципиально минимальная продолжительность переключения транзистора характеризуется величиной порядка $1/f_{\text{пр}}$, где $f_{\text{пр}}$ — предельная частота эффективного усиления транзистора, достигающая, например, у транзистора П403 значения 120 Мгц. Однако время переключения триггера значительно больше, так как в триггере транзистор работает в режиме насыщения и после прихода импульса запуска остается в состоянии насыщения еще в течение заметного промежутка времени. Эта задержка времени перехода транзистора из открытого состояния в запятое обусловлена рассасыванием неосновных носителей заряда, скопившихся в базе насыщенного транзистора.

Устранение насыщения достигается в схемах, получивших название ненасыщенных триггеров. На рис. 18, а приведена схема одного из вариантов ненасыщенного триггера, которая отли-

чается от обычной схемы наличием двух диодов D и дополнительного источника напряжения E_c . Диоды служат фиксаторами уровня.

Как видно из рис. 18, б, если выполняется неравенство $|E_c| < |E_k|$, то при запертом транзисторе заперт и диод. Последний остается в запертом состоянии и после отпирания транзистора, пока напряжение на коллекторе U_k ниже напряжения $-E_c$. Когда же напряжение U_k повысится настолько, что оно станет выше $-E_c$, диод отпирется и начнет выполнять функции фикса-

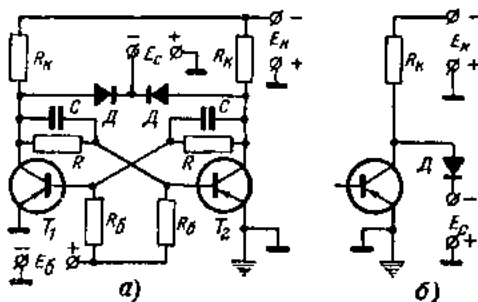


Рис. 18. Ненасыщенный триггер.

тора уровня, т. е. будет поддерживать напряжение коллектора равным $-E_c$. Величина напряжения E_c выбирается такой, чтобы транзистор находился в режиме, близком к насыщению. Накопление неосновных носителей заряда в области базы не имеет места, так как они замыкаются через открытый диод, представляющий собой малое сопротивление. При увеличении тока эмиттера увеличивается ток в цепи фиксирующего диода, а ток через нагрузочное сопротивление практически сохраняется неизменным.

Для быстродействующих триггеров необходимо применять диоды, пригодные для работы в ключевом режиме. В этом отношении они характеризуются двумя основными параметрами: продолжительностью установления прямого сопротивления при насыщении и временем восстановления полной величины обратного сопротивления при запирании.

Первый параметр определяет быстродействие диода при его отпирании. У высокочастотных диодов продолжительность установления прямого сопротивления при насыщении составляет 0,01—0,1 мксек.

Второй параметр определяет быстродействие диода при его запирании. Время восстановления может оказаться значительным, так как после подачи на диод обратного напряжения носители зарядов рассасываются не сразу. Это время обычно существенно больше времени установления прямого сопротивления. Для его уменьшения в цепях диодов необходимо применять сопротивление малой величины.

Триггеры на туннельных диодах. Основное свойство туннельного диода — наличие падающего участка в вольт-амперной характеристике (рис. 19) — позволяет строить на этих полупроводниковых приборах быстродействующие триггеры. Рассмотрим схему триггера с одним туннельным диодом (рис. 19, а).

Сопротивление нагрузки R и напряжение питания E туннельного диода D выбраны такими, что нагрузочная прямая пересекает вольт-амперную характеристику диода в трех точках: O , A и I (рис. 19, б). Точки O и I соответствуют устойчивым состояниям равновесия, а точка A — неустойчивому состоянию.

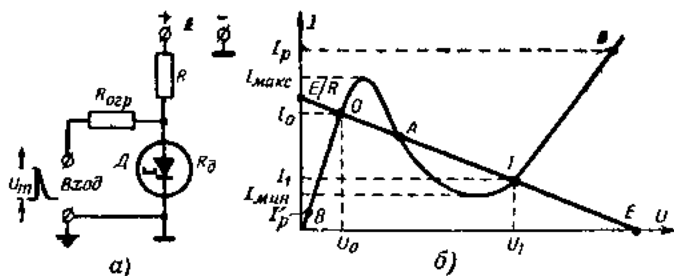


Рис. 19. Триггер на туннельном диоде.

Пусть триггер находится в положении равновесия O . Это положение характеризуется напряжением U_0 и током I_0 . Для переключения триггера в положение I нужно подать на его вход запускающий положительный импульс такой амплитуды U_m , чтобы результирующий ток через диод $I_p = I_0 + \frac{U_m}{R_{огр}}$ (при $R_{огр} \gg R_d$) стал больше тока $I_{макс}$. Току I_p соответствует точка B . По окончании действия запускающего импульса ток I_p уменьшится до значения I_1 и состояние равновесия триггера определится точкой I .

Новое переключение триггера (из положения I в положение O) производится импульсом запуска отрицательной полярности. Амплитуда U'_m этого импульса должна быть такой, чтобы выполнялось соотношение $I'_p = I_1 - \frac{U'_m}{R_{огр}} < I_{мин}$, т. е. чтобы результирующий ток I'_p был меньше тока $I_{мин}$. При этих условиях ток скачком изменится от значения I_1 до значения I'_p (точка B) и, когда прекратится действие запускающего импульса, примет значение I_0 . Таким образом, этот триггер перебрасывается чередующимися импульсами противоположных полярностей.

Триггеры с одним туннельным диодом используются редко, так как их работа не отличается высокой надежностью. В измерительных схемах, особенно счетных, преобладают триггеры, выполняемые на двух диодах. Такие триггеры можно перебра-

сывать однополярными импульсами. Рассмотрим принцип действия двухдиодного триггера с индуктивной связью (рис. 20).

Напряжения источника питания E и сопротивления R_2 и R_3 выбраны такими, чтобы общее напряжение U на диодах D_1 и D_2 (рис. 20, а и б) определялось соотношением $U=U_0+U_1$, где U_0 — напряжение, соответствующее состоянию 0 (точка 0 на рис. 19,б), а U_1 — напряжение, соответствующее

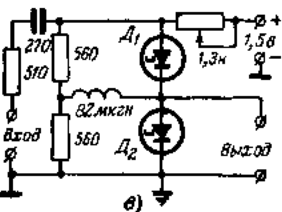
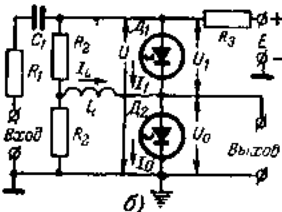
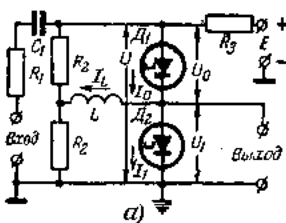


Рис. 20. Триггеры на двух туннельных диодах.

правления. В результате действия э. д. с. самоиндукции после окончания запускающего импульса напряжение на диоде D_2 уменьшается до величины U_0 , а ток возрастает до значения I_0 . Триггер переключается в состояние 0.

Новый положительный импульс запуска вызывает переключение триггера в исходное положение, только процессы, относившиеся в предыдущем случае к диоду D_1 , будут теперь происходить в диоде D_2 , и наоборот (рис. 20, б).

Триггеры на туннельных диодах отличаются высоким быстродействием. В зарубежной литературе описаны схемы, позволяющие получить время переброса менее 10 нсек.

На рис. 20, в изображена триггерная ячейка счетчика на туннельных диодах.

Предположим, что триггер находится в состоянии 1 (рис. 20,а). Для переключения его в состояние 0 на вход подается положительный импульс. Амплитуда импульса U_m должна быть такой, чтобы при суммарном напряжении U_0+U_m ток диода D_1 был больше тока $I_{мвкс}$. После того как ток диода D_1 пройдет максимум, он скачком уменьшается, стремясь к значению тока I_1 . Напряжение на этом диоде стремится к величине U_1 . Разностный ток I_L сначала остается неизменным, так как ток через индуктивность не может изменяться скачком, но далее, по мере уменьшения тока диода D_1 , уменьшается и ток через индуктивность. Когда ток диода D_1 приближается к величине I_1 , ток через индуктивность становится близким к нулю. При этом в катушке возникает э. д. с. самоиндукции e_L одного с током на-

Поясним, каким образом выбраны ее параметры.

Диоды D_1 и D_2 имеют одинаковые вольт-амперные характеристики (разброс не превышает $\pm 3-5\%$). По ним выбраны токи $I_0=1$ ма и $I_1=0,36$ ма. Этим токам соответствуют напряжения $U_0=40$ мв и $U_1=400$ мв.

Ток через индуктивность

$$I_L = I_0 - I_1 = 0,64 \text{ ма.}$$

Если схема находится в положении θ , то ток через верхнее (по схеме) сопротивление R_2

$$I_R = \frac{U_1}{R_2} = \frac{0,4}{R_2} \text{ в/ом,}$$

а ток через нижнее сопротивление R_2

$$I'_R = \frac{U_0}{R_2} = \frac{0,04}{R_2} \text{ в/ом.}$$

Так как $I_R - I'_R = I_L$, то

$$\frac{0,4}{R_2} - \frac{0,04}{R_2} = 0,64 \text{ ма}$$

и, следовательно,

$$R_2 = \frac{0,36}{0,64 \cdot 10^{-3}} = 560 \text{ ом.}$$

Суммарное напряжение

$$U = U_0 + U_1 = 0,44 \text{ в.}$$

Ток через сопротивление R_3

$$I_{\text{общ}} = I_R + I_1 \approx 1,07 \text{ ма.}$$

Поскольку $U = E - I_{\text{общ}} R_3$,

$$R_3 = \frac{E - U}{I_{\text{общ}}} = \frac{E - 0,44}{1,07 \cdot 10^{-3}}.$$

При $E=1,5$ в сопротивление $R_3 \approx 1$ ком.

8. ВРЕМЕННЫЕ СЕЛЕКТОРЫ

Временной селектор представляет собой устройство с двумя входами и одним выходом. Напряжение на выходе такого устройства появляется только в течение времени совместного действия напряжений на обоих входах.

Широко распространен временной селектор, выполненный на пентоде (рис. 21, а). Последний запирается по управляющей и защитной сеткам, которые служат входами селектора. Выход-

ное напряжение снимается с анода лампы. Если подать положительный импульс только на первую или третью сетку, то пентод останется в запертом состоянии и напряжение на его аноде не изменится. Когда же положительные импульсы поступают на обе сетки сразу, то пентод отпирается на время совместного действия импульсов. С анода лампы снимается отрицательный импульс.

В качестве примера временного селектора на транзисторах рассмотрим схему, приведенную на рис. 21, б. В этой схеме два

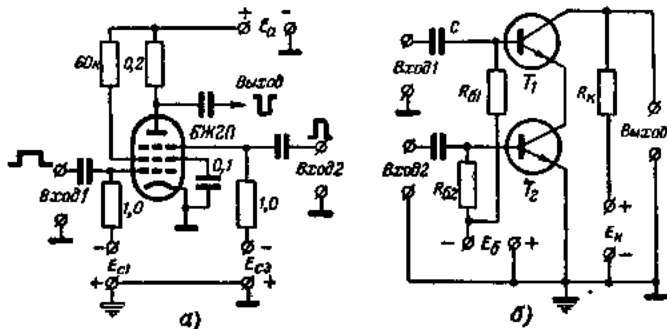


Рис. 21. Примеры временных селекторов.

транзистора включены последовательно. Оба транзистора заперты напряжением смещения E_b . При подаче положительных импульсов достаточной амплитуды U_m сразу на оба входа селектора транзисторы отпираются и приходят в состояние насыщения. В этом состоянии, как известно, все электроды имеют весьма близкие потенциалы ($U_c \approx 0$ и $U_n \approx 0$) и насыщенный транзистор подобен короткозамкнутому элементу, у которого все три электрода стянуты в точку. Следовательно, после отпираания обоих транзисторов напряжение на выходе схемы падает почти до нуля. Если же положительный импульс поступит только на один вход, то выходное напряжение селектора будет неизменным, так как второй транзистор останется запертым.

9. СРАВНИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Сравнивающее устройство предназначено для сравнения напряжений. В момент равенства напряжений, поданных на два входа устройства, на его выходе появляется сигнал. Такие устройства применяют главным образом для сравнения постоянного или переменного напряжения с линейно изменяющимся (пилообразным) напряжением.

На рис. 22 приведены схемы сравнивающих устройств, предназначенных для сравнения постоянного напряжения U_0 с линейно изменяющимся напряжением. В устройстве, схема которого изображена на рис. 22, а, напряжение U_0 , подводимое ко