

Лекция 11.

Устройство и принцип работы динистора и тиристора.

Тиристор — это четырехслойный полупроводниковый прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями: состоянием низкой проводимости (тиристор закрыт) и состоянием высокой проводимости (тиристор открыт). Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое в электрической цепи осуществляется внешним воздействием на прибор. К числу факторов, наиболее широко используемых для отпирания тиристорov, относится воздействие напряжением (током) или светом (фототиристоры).

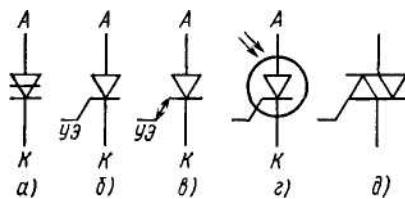


Рис. 6.1. Условные обозначения тиристорov: динистора (а), однооперационного тиристора (б), двухоперационного тиристора (в), фототиристора (г), симистора (д)

Основными типами являются диодные (рис. 6.1, а) и триодные (рис. 6.1, б—г) тиристоры.

В диодных тиристорах (динисторах) переход прибора из закрытого состояния в открытое связан с тем, что напряжение между анодом и катодом достигает некоторой граничной величины, являющейся параметром прибора. В триодных тиристорах управление состоянием прибора производится по цепи третьего — управляющего электрода. По цепи управляющего электрода при этом могут выполняться либо одна, либо две операции изменения состояния тиристора. В зависимости от этого различают одно- и двухоперационные тиристоры. В однооперационных тиристорах (рис. 6.1, б) по цепи управляющего электрода осуществимо только отпирание тиристора. С этой целью на управляющий электрод подается положительный относительно катода импульс напряжения. Запирание одно- операционного тиристора, а также динистора производится по цепи анода изменением полярности напряжения анод — катод. Двухоперационные тиристоры допускают по цепи управляющего электрода как отпирание, так и запирание прибора. Для запирания на управляющий электрод подается отрицательный импульс напряжения. В фототиристорах (рис. 6.1, г) отпирание прибора производится с помощью светового импульса.

Все перечисленные приборы выполняют функцию бесконтактного ключа, обладающего односторонней проводимостью тока. Прибор, позволяющий проводить ток в обоих направлениях, называют симметричным тиристором (симистором). По своему назначению симистор (рис. 6.1, д)

призван выполнять функции двух обычных тиристоров (рис. 6.1, б), включенных встречно-параллельно.

Динистор представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы четыре чередующиеся области с различным типом проводимости $p_1 - n_1 - p_2 - n_2$ (рис. 5.2, а). На границах раздела этих областей возникнут р-п-переходы: крайние переходы (J_1 и J_3) называются эмиттерными, а области, примыкающие к ним, - эмиттерами; средний р-п-переход (J_2) называется коллекторным. Внутренние n_1 - и p_2 -области структуры называется базами. Область p_1 называется анодом (А), область n_2 - катодом (К).

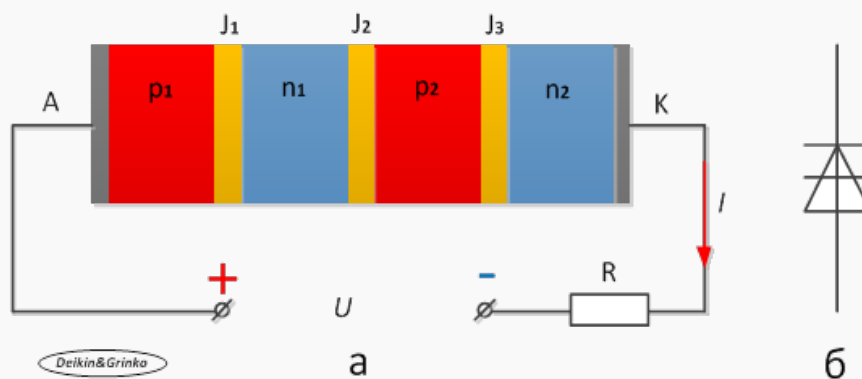


Рис. 5.2. Структура динистора (а) и его условное графическое обозначение (б)

Рассмотрим процессы, происходящие в динисторе при подаче прямого напряжения, т. е. «+» на анод, «-» на катод. В этом случае крайние р-п-переходы J_1 и J_3 смещены в прямом направлении, средний переход J_2 смещен в обратном направлении. Динистор можно представить в виде двухтранзисторной структуры (рис. 5.3). Так как переходы J_1 и J_3 смещены в прямом направлении, из них в области баз инжектируются носители заряда: дырки из области p_1 , электроны из области n_2 . Эти носители заряда диффундируют в областях баз n_1 и p_2 , приближаясь к коллекторному переходу, и перебрасываются его полем через переход J_2 . Дырки, инжектированные из области p_1 , и электроны из области n_2 движутся через переход J_2 в противоположных направлениях, создавая общий ток I .

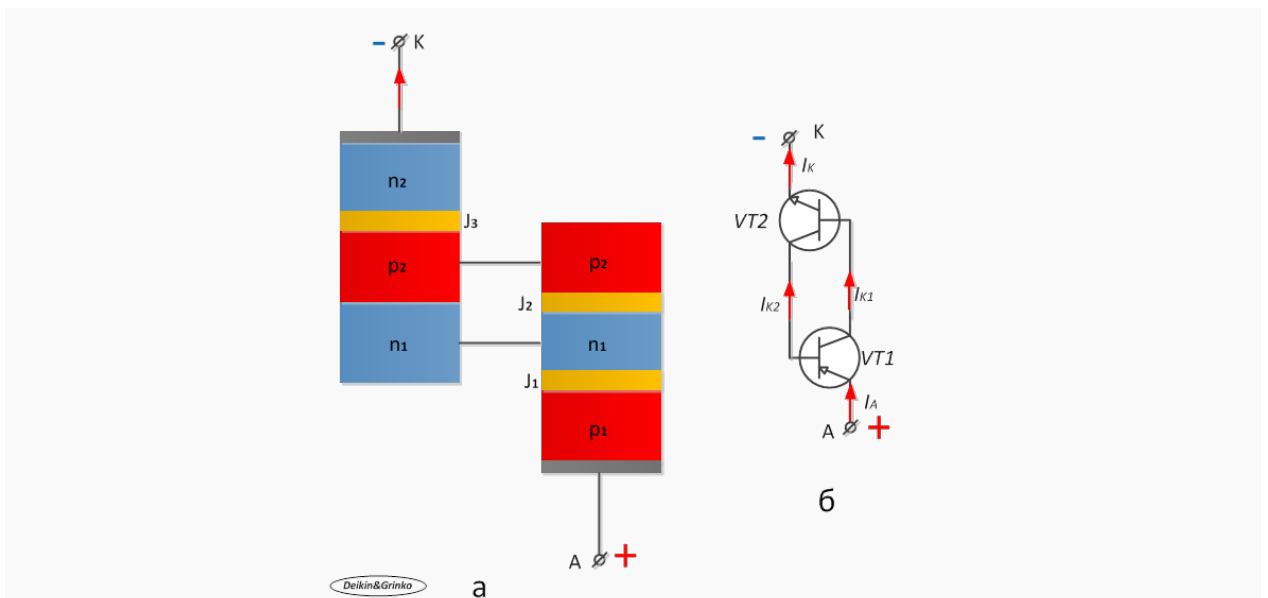


Рис. 5.3. Структура (а) и схема двухтранзисторного эквивалента динистора (б)

При малых значениях внешнего напряжения все оно практически падает на коллекторном переходе J_2 . Поэтому к переходам J_1 и J_3 , имеющим малое сопротивление, приложена малая разность потенциалов и инжекция носителей заряда невелика. В этом случае ток через динистор мал и равен обратному току через переход J_2 .

При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала изменяется незначительно. При дальнейшем увеличении напряжения, по мере увеличения ширины перехода J_2 , все большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации. При определенной величине напряжения носители заряда ускоряются настолько, что при столкновении с атомами р-п-перехода J_2 ионизируют их, вызывая лавинное размножение носителей заряда. Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля переходят в область p_2 , а электроны в область n_1 . Ток через переход J_2 увеличивается, а его сопротивление и падение напряжения на нем уменьшаются. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам J_1 и J_3 и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока и токов инжекции. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода J_2 становится малым. Носители заряда, появившиеся в областях вследствие инжекции и лавинного размножения, приводят к уменьшению сопротивления всех областей динистора, и падение напряжения на нем становится незначительным. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок 2 с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 5.4). После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении (участок 3). Участок 1 соответствует закрытому состоянию динистора.

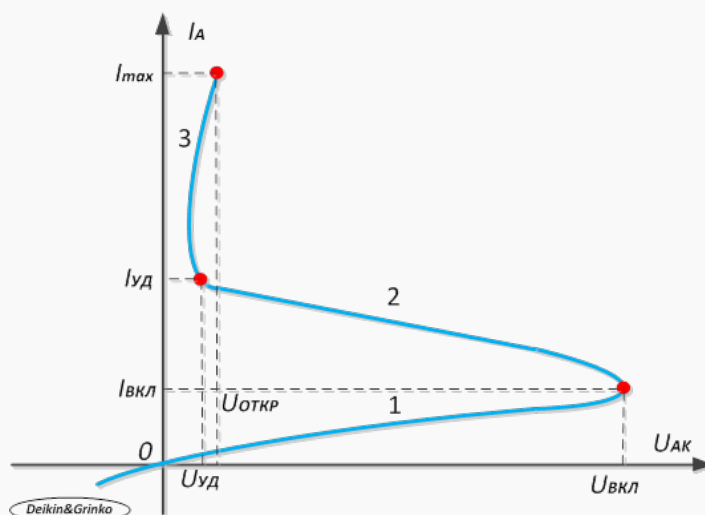


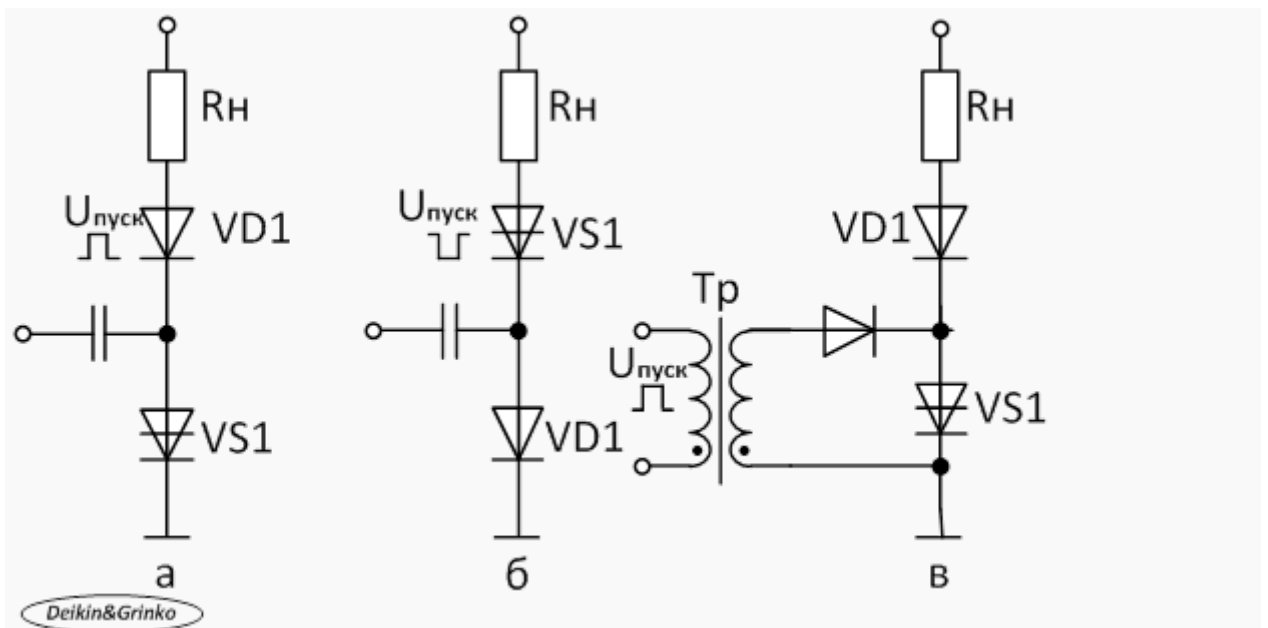
Рис. 5.4. Вольт-амперная характеристика динистора

Динистор характеризуется максимально допустимым значением прямого тока I_{max} (рис.5.4), при котором на приборе будет небольшое напряжение $U_{откр}$. Если уменьшать ток через прибор, то при некотором значении тока, называемом удерживающим током $I_{уд}$, ток резко уменьшается, а напряжение резко повышается, т. е. динистор переходит обратно в закрытое состояние, соответствующее участку 1. Напряжение между анодом и катодом, при котором происходит переход тиристора в проводящее состояние, называют напряжением включения $U_{вкл}$. При подаче на анод отрицательного напряжения коллекторный переход J_2 смещается в прямом направлении, а эмиттерные переходы в обратном направлении. В этом случае не возникает условий для открытия динистора и через него протекает небольшой обратный ток.

Прямое напряжение (напряжение источника питания U_n) на запертом динисторе выбирается из условия $U_{пр} \leq U_{пр.макс.}$, где $U_{пр.макс.} \approx 0,5 U_{вкл}$. Для переключения динистора из запертого в открытое состояние необходимо увеличить прямое напряжение так, чтобы оно превысило напряжение включения.

$$U_{пр.} \geq U_{вкл.}$$

Наиболее часто динисторы используются в устройствах, где переключение производится импульсами напряжения соответствующей полярности. Поэтому в справочниках вместо $U_{вкл}$ часто указывают импульсное переключающее пусковое напряжение $U_{пуск.}$, при котором гарантировано условие: $U_{пр.макс.} + U_{пуск} \geq U_{вкл}$ (Петрович В. П., 2008).



Способы отпирания динисторов

(а - для пускового импульса положительной полярности; б - для пускового импульса отрицательной полярности; в - через импульсный трансформатор)

Длительность пусковых импульсов обычно составляет несколько микросекунд. VD2 увеличивает входное сопротивление устройства. Если амплитуда пусковых импульсов мала, то используют повышающий импульсный трансформатор (рис.5.5,в).

Триодный тиристор (тринистор) отличается от динистора наличием вывода от одной из баз. Это вывод называется управляющим электродом (рис. 5.6).

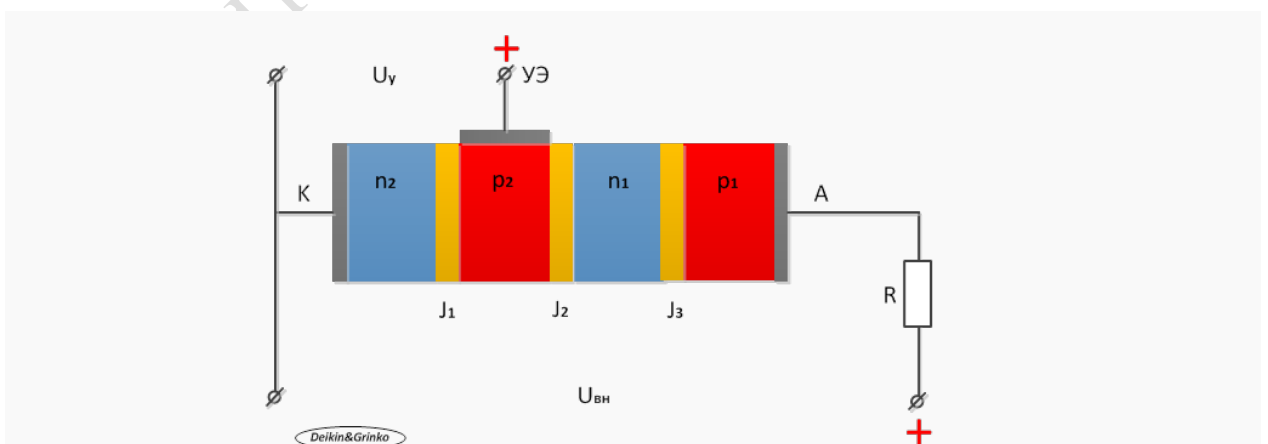


Рис. 5.6. Структура тиристора

Если подключить внешний источник $U_{ВН}$ так, как показано на рис. 5.6, то получим, что р-п-переходы J_1 и J_3 будут смещены внешним источником в прямом направлении, а средний р-п-переход J_2 будет смещен в обратном направлении, и во внешней цепи будет протекать только исчезающе маленький обратный ток коллекторного перехода J_2 . Подключим другой внешний источник U_y (источник управления) между катодом и управляющим электродом (УЭ). Тогда ток управления, протекающий под действием источника управления, при определенной своей величине может привести к лавинообразному нарастанию тока в полупроводниковой структуре до тех пор, пока он не будет ограничен резистором R в цепи источника питания $U_{ВН}$. Произойдет процесс включения тиристора.

Для рассмотрения этого явления представим тиристор в виде двух, объединенных в одну схему транзисторов $VT1$ и $VT2$ (рис. 5.7, а), типа р-п-р и п-р-п, соответственно. Оба транзистора включены по схеме с общим эмиттером (рис. 5.7, б).

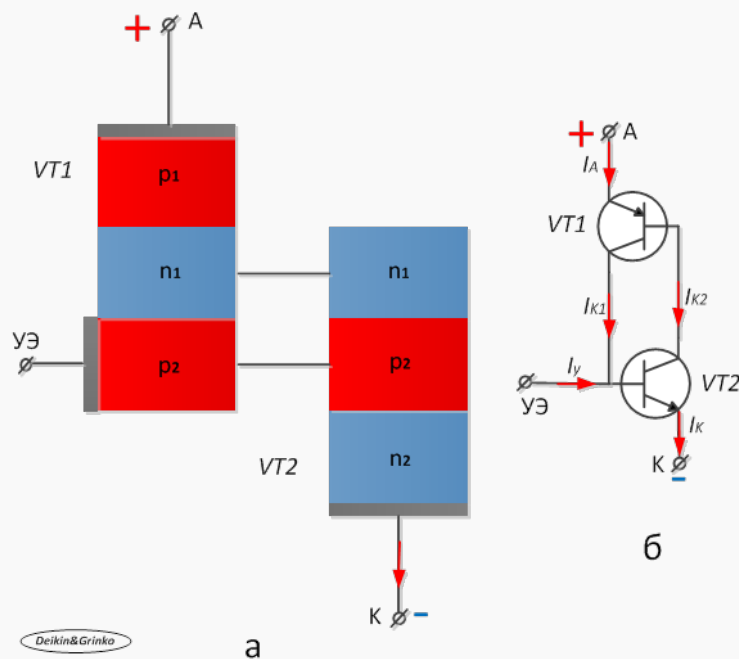


Рис. 5.7. Структура (а) и схема двухтранзисторного эквивалента тиристора (б)

При создании разности потенциалов между анодом (А) и катодом (К) в прямом направлении («+» на аноде, «-» на катоде) оба транзистора будут закрыты, так как базовые токи их будут отсутствовать. При подключении источника управления U_y во входной цепи транзистора $VT2$ потечет базовый ток, являющийся током управления тиристора I_y . Под действием этого тока в коллекторной цепи транзистора $VT2$ потечет ток $I_{K2} = \beta_2 I_y$, где β_2 - коэффициент передачи по току транзистора $VT2$. Но этот ток I_{K2} протекает по цепи «эмиттер - база» транзистора $VT1$ и является его входным, базовым током

$I_{\beta 1} = I_{K2}$. Под воздействием тока $I_{\beta 1}$ в выходной коллекторной цепи транзистора $VT1$ потечет коллекторный ток:

$$I_{K1} = \beta_1 I_{\beta 1} = \beta_1 I_{K2} = \beta_1 \beta_2 I_y, \quad (5.1)$$

т. е. коллекторный ток I_{K1} является усиленным в $\beta_1 \beta_2$ раз током управления I_y , и протекает ток I_{K1} опять по базовой цепи транзистора $VT2$, там, где протекает и ток I_y . Поскольку I_{K1} оказывается значительно больше тока I_y , процесс взаимного усиления транзисторами токов продолжается до тех пор, пока оба транзистора не войдут в режим насыщения, что соответствует включению тиристора. Описанный процесс является процессом внутренней положительной обратной связи, под действием которой и происходит лавинообразное нарастание тока в цепи тиристора.

После того, как тиристор включился, он сам себя поддерживает в открытом состоянии, так как при условии $I_{K2} > I_y$ внутренняя обратная связь остается положительной, и в этом случае источник управления уже оказывается ненужным. С учетом (5.1) это условие записывается в виде:

$$\beta_1 \beta_2 I_y > I_y. \quad (5.2)$$

Откуда условие включения тиристора:

$$\beta_1 \beta_2 > 1. \quad (5.3)$$

Для того чтобы выключить тиристор, необходимо прервать ток, протекающий в его силовой цепи, на короткий промежуток времени, достаточный для рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника и восстановления управляющих свойств. Чтобы снова включить тиристор, необходимо снова пропустить в его цепи управления ток I_y , чтобы снова запустить процесс внутренней положительной обратной связи. Таким образом, тиристор представляет собой бесконтактный ключ, который может быть только в двух устойчивых состояниях: либо в выключенном, либо во включенном.

Вольт-амперная характеристика тиристора представлена на рис. 5.8. Чем больше ток управления, тем меньше напряжение включения $U_{вкл}$. Ток управления, при котором тиристор переходит на спрямленный участок вольт-амперной характеристики (показано на рис. 5.6 пунктиром) называют током управления спрямления $I_{y \text{ спр}}$.

При изменении полярности приложенного к тиристорному напряжению, эмиттерные р-п-переходы J_1 и J_3 будут смещены в обратном направлении, тиристор будет закрыт, а вольт-амперная характеристика будет представлять собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики обыкновенного диода.

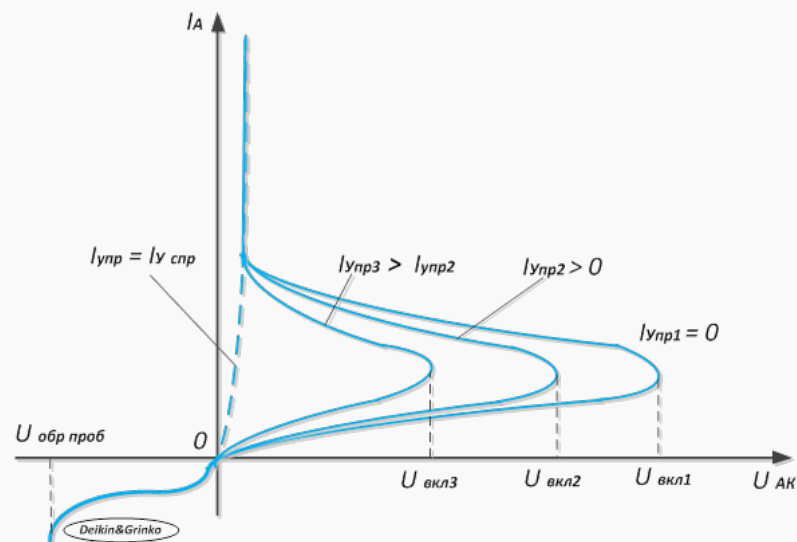


Рис.5.8. Вольт-амперная характеристика тринистора

Таким образом, тиристор представляет собой частично управляемый вентиль, который можно перевести в проводящее состояние при наличии одновременно двух факторов: положительный потенциал анода относительно катода; подача управляющего сигнала в виде тока управления в цепи управляющего электрода. Если хотя бы один из этих факторов отсутствует, то тиристор будет оставаться в закрытом состоянии.

Частичная управляемость тиристора заключается в том, что после включения тиристора, цепь управления становится ненужной, так как он сам себя поддерживает во включенном состоянии. Выключить обычный тиристор по цепи управления невозможно. Поэтому он называется однооперационным тиристором или в зарубежной терминологии SCR (*Silicon Controlled Rectifier*). Для запираания тиристора необходимо каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов $VT1$ и $VT2$.

На электрических принципиальных схемах незапираемые тиристоры обозначаются условными графическими обозначениями, представленными на рис. 5.9.

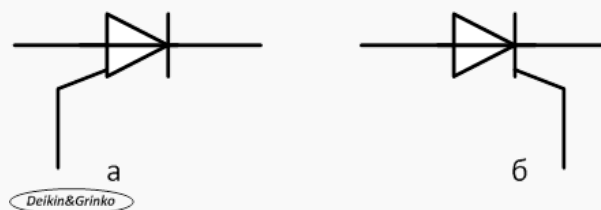


Рис. 5.9. Условные обозначения незапираемых тринисторов с управлением по аноду (а), с управлением по катоду (б)

Для надёжного отпирания тринистора от источника постоянного тока I_y и U_y выбирают из условий: $I_y \geq I_{y.cпр}$; $U_y \geq U_{y.cпр}$; $I_y U_y \leq P_{y.макс}$,

Где $P_{y.макс}$ - максимальная мощность, рассеиваемая на управляющем электроде.

Этим же соотношением руководствуются при импульсном управлении, если длительность пусковых импульсов не короче 100мксек. При импульсном управляющем сигнале меньше 100мксек исходят из соотношения:

$$(2 \div 3)I_{y.cпр} \leq I_{y.имп} \leq I_{y.имп.макс},$$

Где $I_{y.имп}$ - импульсный ток управления;

$I_{y.имп.макс}$ - импульсный ток управления максимальный.

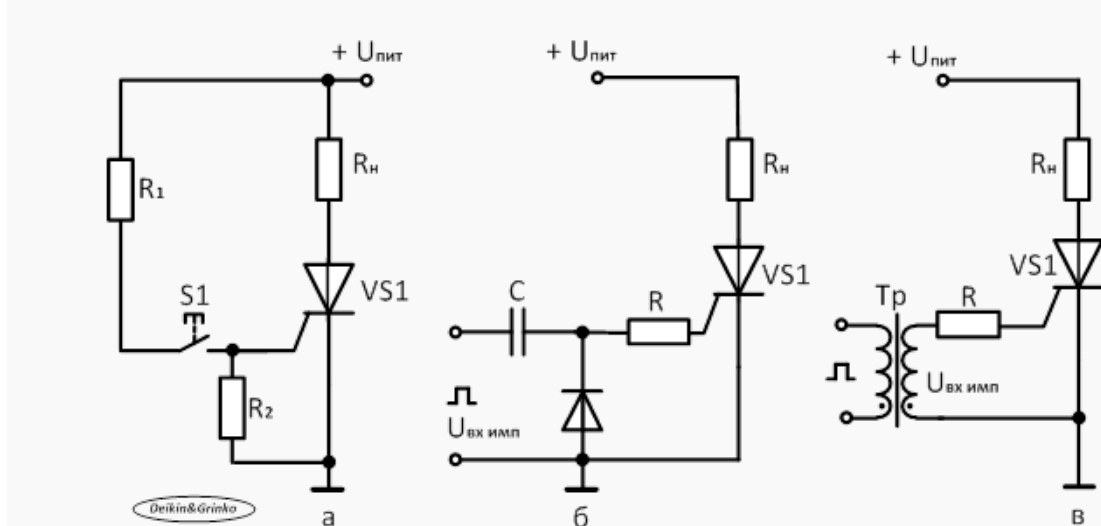


Рис.5.10. Способы отпирания тринисторов

(а - от источника постоянного тока; б, в - импульсным сигналом)

а) $I_y \geq I_{y.cпр}$, обычно $I_y = (1,1 - 1,2) I_{y.cпр}$

$$R1 = U_{пит} / (1,1 \div 1,2) I_{y.cпр}$$

б) С обычно равен 0,01 - 0,05мкФ

Диод предотвращает появление отрицательного импульса на управляющем электроде при разрядке конденсатора.

в) импульсные трансформаторы используются для того, чтобы развязать гальванически пусковую и силовую цепи. R служит для ограничения пускового тока.

$$R \geq U_{\text{вх.имп.}} / I_{\text{у.имп.макс.}}$$

Где $U_{\text{вх.имп.}}$ - амплитуда управляющего импульса, подаваемая на вход устройства (Петрович В. П., 2008).

Под процессом запираания четырёхслойного полупроводникового прибора понимают переход его из проводящего состояния в запертое. Для этого необходимо уменьшить ток прибора до $I_{\text{пр}} < I_{\text{уд}}$ или разомкнуть анодную цепь, что соответствует $I_{\text{пр}} = 0$. Второй способ запираания заключается в подаче на анод прибора обратного напряжения в течение короткого времени.

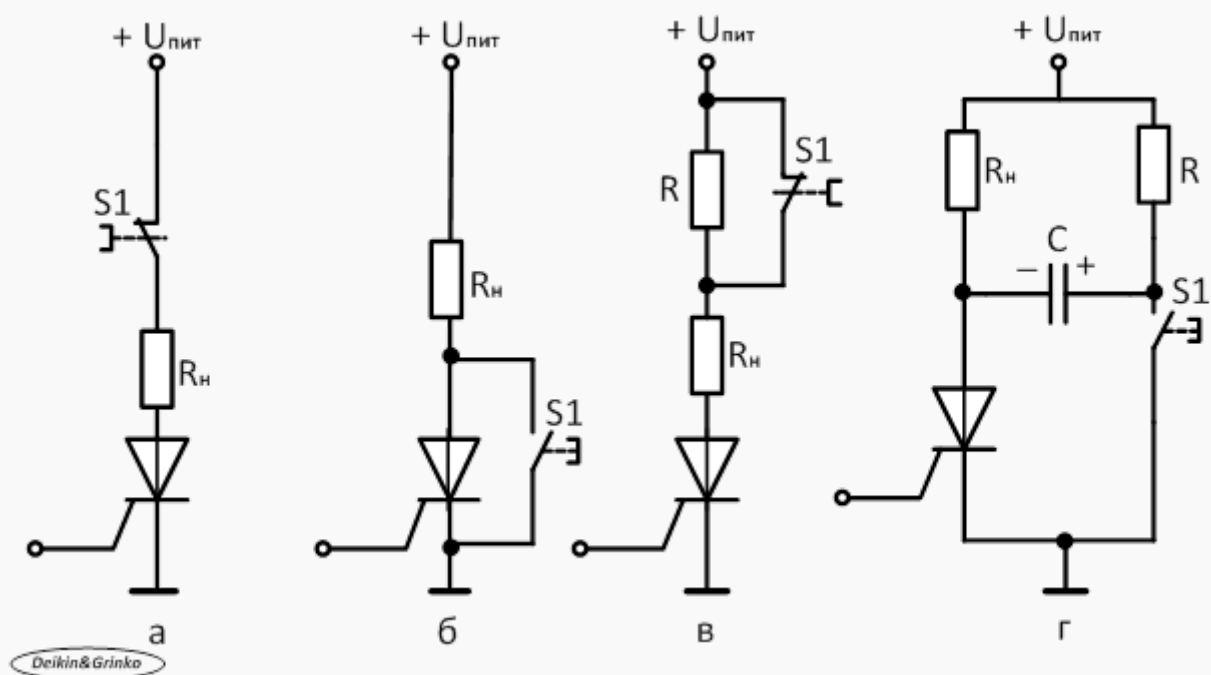


Рис.5.11. Способы запираания триисторов в цепях постоянного тока: а - разрывом анодной цепи; б - шунтированием прибора; в - увеличением сопротивления в анодной цепи; г - коммутирующим конденсатором (рисунок выполнен авторами)

В схеме 5.11,а запираание триистора происходит при кратковременном нажатии кнопки S1, что размыкает анодную цепь.

Рис.5.11,б триистор запирается при нажатии шунтирующей кнопки, через контакты которой при этом проходит весь ток нагрузки, а анодный ток становится равным 0. В такой схеме функцию кнопки может выполнять транзистор, отпираемый током базы на время, необходимое на отключение триистора.

Рис.5.11,в при кратковременном нажатии кнопки последовательно с нагрузкой R_n включается резистор R , сопротивление которого выбирается из условия:

$$U_n / (R_n + R) = I_{пр} < I_{уд},$$

U_n - напряжение источника питания;

R_n - сопротивление нагрузки

Рис.5.11,г запираение прибора осуществляется с помощью коммутирующего конденсатора. После отпирания через тринистор протекает ток нагрузки $I_{пр} = U_n / R_n$, а коммутирующий конденсатор C через резистор R и открытый тиристор заряжается практически до напряжения источника питания $U_c \approx U_n$. Продолжительность заряда с момента включения тиристора составляет примерно $t_{зар} \approx 3RC$. Если теперь кратковременно нажать на кнопку, то положительная обкладка окажется подключённой к катоду, а отрицательная к аноду. К прибору прикладывается обратное напряжение $U_{обр} \approx U_n$. В цепи конденсатора, кнопки и тиристора проходит разрядный ток для тиристора в обратном направлении. Когда результирующий ток тиристора становится меньше $I_{уд}$, последний запирается. Вместо кнопки в этой схеме часто используют второй тиристор, на который подаётся сигнал выключения. Показанные на рис 5.11 способы запираения могут использоваться и для динисторов. В устройствах, работающих в цепях переменного тока, для запираения прибора не требуется специального сигнала, так как тиристоры выключаются автоматически в начале очередного отрицательного полупериода на аноде (Петрович В. П., 2008) .