

# СПОСОБЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ

## Общие требования

Основное назначение устройств и схем управления — создание управляющего сигнала, необходимого для надежного отпирания тиристоров. Возможны три способа управления тиристорами: с помощью сигнала управления; превышением напряжения переключения; быстро нарастающим напряжением  $du/dt$  (второй и третий способы применяются в основном для включения диодных тиристоров).

Отпирание тиристоров с помощью сигнала управления может осуществляться от источника постоянного, переменного и импульсного токов. Использование источников постоянного и импульсного токов характерно для управления триодными и запираемыми тиристорами, причем управление запираемыми тиристорами имеет ряд особенностей, связанных с возможностью включения и выключения прибора с помощью управляющего электрода импульсами различной полярности. Симметричный тиристор по своему назначению является переключателем переменного тока, поэтому для управления им часто используют источники переменного напряжения.

Требования, предъявляемые к схемам управления, вытекают из физических и конструктивных особенностей самих приборов, поэтому параметры входной цепи удобно рассмотреть с помощью диаграммы управления, приведенной на

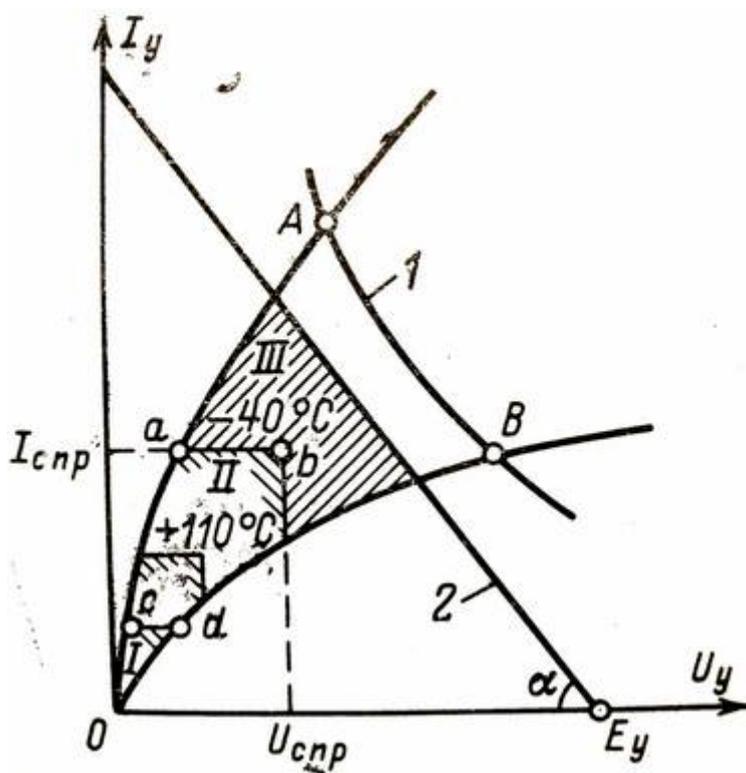


Рис. 1 Диаграмма управления.

В поле, ограниченном кривыми OA и OB, можно различить три области. В области тиристор не включается. В области II включение тиристор не гарантируется. Границы этой, области ограничены параметрами цепи управления: током спрямления  $I_{спр}$  и напряжением спрямления  $U_{спр}$ . Заштрихованная область III определяет рабочее состояние тиристора. Сверху область III ограничена кривой максимально допустимой входной мощности  $P_{у.макс}$  (кривая 1). В зависимости от изменения температуры окружающей среды границы заштрихованной области могут перемещаться влево и вниз.

Для надежного включения тиристора источник управляющего сигнала должен быть рассчитан на ток и напряжение, которые должны лежать в заштрихованной области, не превосходя при этом значений, указанных в технических условиях. Условиями надежного оттирания тиристор являются:

$$I_y \leq I_{спр}; U_y \geq U_{спр}; I_y U_y \leq P_{у.макс},$$

$I_{спр}$  — ток спрямления;  $U_{спр}$  — напряжение спрямления.

Линия нагрузки (кривая 2) строится из точки  $E_y$  под углом  $\alpha$ , котангенс которого пропорционален ограничительному сопротивлению  $R_y$ , включая внутреннее сопротивление источника.

В технических условиях на тиристоры приводятся параметры  $U_y$  и  $I_y$ , измеренные на постоянном токе, однако управление от источников постоянного тока не нашло широкого применения. Более эффективно управление тиристорами ст источников переменного напряжения (фазовое управление).

Однако способность тиристоров работать в импульсных режимах позволяет использовать для их управления наиболее экономичные импульсные источники тока. В этом случае тиристоры включают кратковременными сигналами определенной амплитуды и длительности, причем амплитуда входного сигнала может значительно превышать постоянный входной ток, а. входная мощность определяется из условия

$$\frac{P_{вх}}{Q} \leq P_{у.макс}.$$

где  $Q$  — скважность импульсов.

Продолжительность импульса ограничивается промежутком времени, необходимым для того, чтобы к концу импульса управления анодный ток по величине превзошел величину тока  $I_{выкл}$  тиристора. С другой стороны, чем меньше длительность запускающего импульса, тем меньше потери на управляющем электроде прибора и тем меньше требуется

мощность от источника для управления. Поскольку рост анодного тока определяется параметрами силовой схемы, а также режимом нагрузки, длительность запускающего импульса выбирается такой, чтобы во всех случаях обеспечить надежное отпирание тиристора.

Для надежного переключения тиристора в общем случае необходим запускающий импульс длительностью

$$\tau_y = (1,5 - 2,0) t_{\text{см}}$$

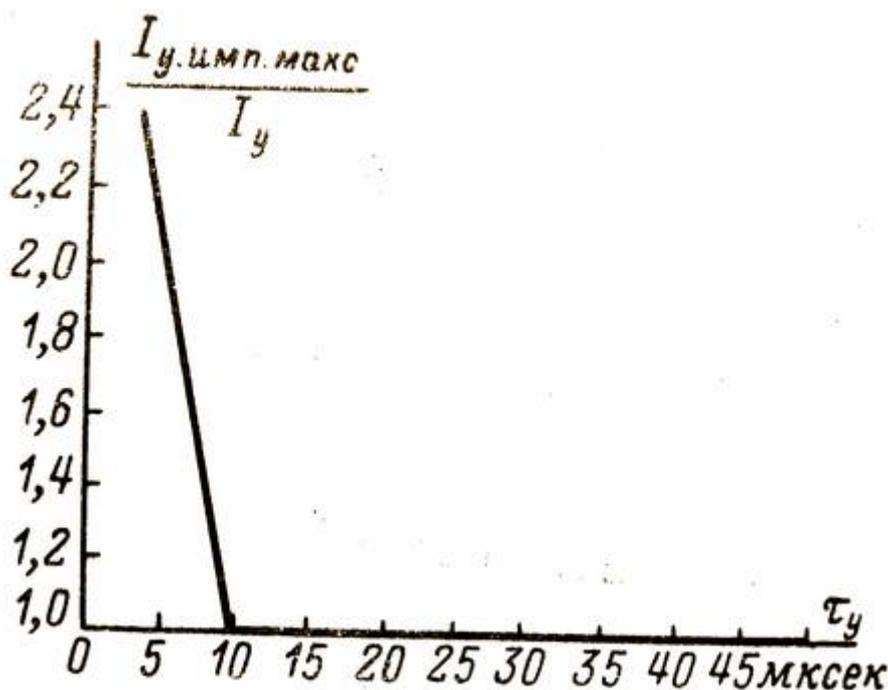


Рис. 2 Зависимость максимального значения импульсного тока управления (или напряжения) от длительности импульса управления

Однако величина  $\tau_y$  может быть значительно снижена за увеличения амплитуды запускающего импульса. Как видно из рис. 2, при увеличении максимального значения амплитуды запускающего импульса длительность  $\tau_y$  уменьшается и, для тиристоров типа КУ201, Д238, Д235 может быть выбрана в пределах от 1,5 до 3,0 мксек.

Выбор того или иного способа управления тиристорами зависит от требований, предъявляемых к конкретной схеме, и назначения данного устройства.

### Схемы управления тиристорами

Управление тиристорами наиболее эффективно при использовании источников переменного и импульсного напряжения. Ниже будет рассмотрен ряд схем, которые можно использовать для управления триодными и симметричными тиристорами.

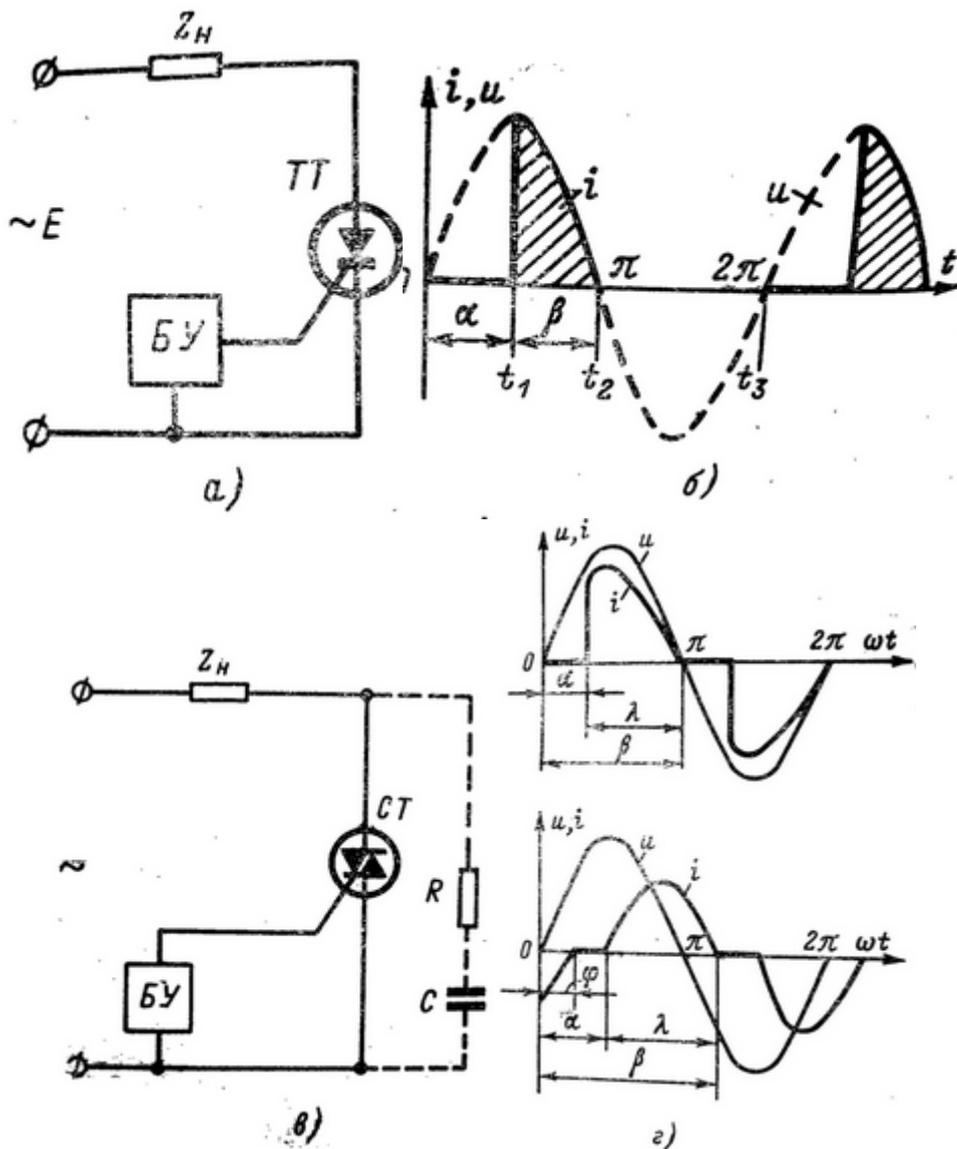


Рис. 3 Ток и напряжение цепи переменного тока.

а – триодного тиристора;

б – диаграмма работы;

в – симметричного тиристора;

г – диаграмма работы симметричного тиристора.

В схеме на рис. 3,а тиристор отпирается в момент подачи сигнала управления и в течение интервала времени ( $t_1 < t < \pi$ ) через него протекает ток, определяемый параметрами нагрузки (рис. 3,б).

Когда на управляющий электрод тиристора сигналы управления не поступают (интервал  $0 < t < t_1$ ) или если к тиристорному приложено обратное напряжение (интервал  $t_2 < t < t_3$ ), то приложенное напряжение практически полностью падает на тиристоре, т. е. он заперт. Изменяя угол открытия  $\alpha$ , можно регулировать ток в нагрузке в течение положительного полупериода питающего напряжения.

В схеме на рис. 3,в симметричный тиристор проводит в течение положительного и отрицательного полупериодов. Если нагрузка  $Z_H$  носит чисто активный

характер, то при включении тиристора СТ форма кривой тока повторяет форму кривой приложенного напряжения. В этом случае угол закрытия  $\beta$  всегда равен  $\pi$ .

В случае индуктивной нагрузки необходимо применять специальные меры по уменьшению допустимой скорости нарастания напряжения  $du/dt$ . Как видно из графика на рис. 3,г, при прохождении тока через нулевое значение питающее напряжение в этот момент имеет значительную величину противоположной полярности. При запираии тиристора СТ при нулевом токе его напряжение целиком прикладывается к тиристору с высокой скоростью, что может привести к выходу прибора из строя или включению его без подачи входного сигнала. Для уменьшения скорости нарастания напряжения силовые электроды тиристора шунтируют RC-цепью.

Управление симметричными тиристорами можно производить и непосредственно от сети переменного тока (рис. 4).

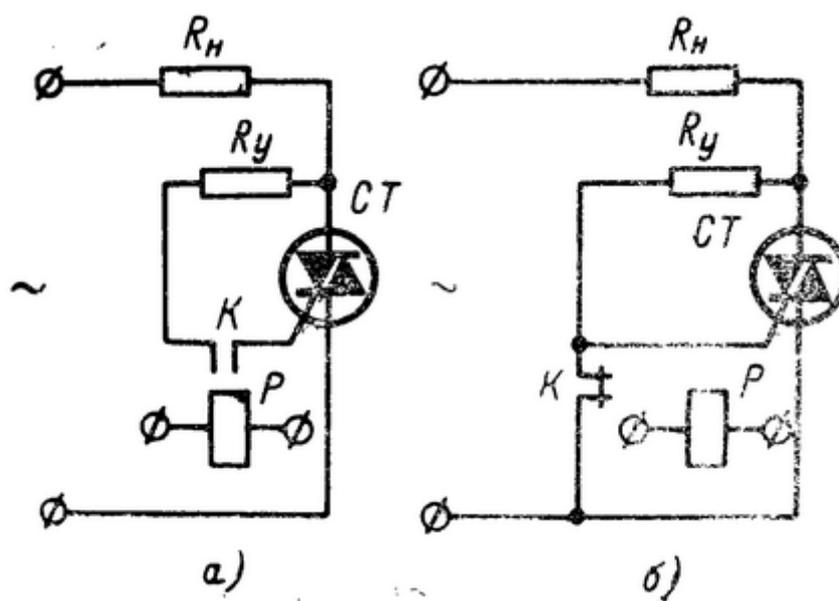


Рис. 4 Схемы подачи импульса запуска на симметричный тиристор

Когда в схеме (рис. 4) контакт К реле Р разомкнут, к управляющему электроду тиристора СТ сигнал не поступает и он заперт. При замыкании контакта К на вход тиристора СТ через ограничительный резистор  $R_y$  поступает сигнал и переключает прибор в проводящее состояние. Будучи включенным, тиристор СТ шунтирует цепь контакта К, ограничивая ток через него.

В отличие от схемы, изображенной на рис. 4,а, в схеме на рис. 4,б контакт К нормально замкнут. При размыкании контакта К на вход тиристора СТ подается запускающий сигнал и прибор включается. Когда контакт К замкнут, вход тиристора СТ зашунтирован.

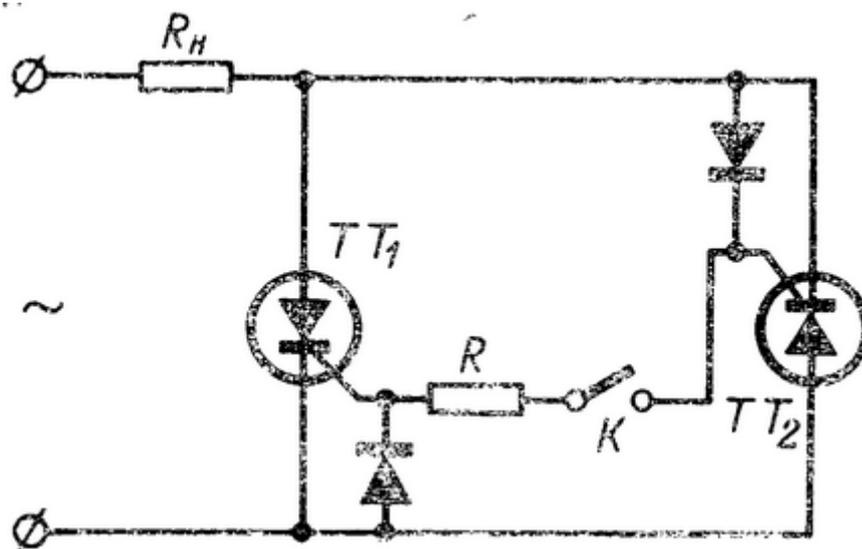


Рис. 5 Схема управления триодными тиристорами.

На рис. 5 приведена схема управления триодными тиристорами, которые включены встречно - параллельно. Управляющие импульсы формируются из анодного напряжения, поэтому работоспособность схемы не зависит от характера нагрузки. Резистор R предназначен для ограничения величины тока управления. При замыкании ключа К отпирается один из тиристоров ТТ1 или ТТ2, к аноду которого в этот момент приложено положительное напряжение. Запирание тиристоров производится при прохождении тока через нулевое значение.

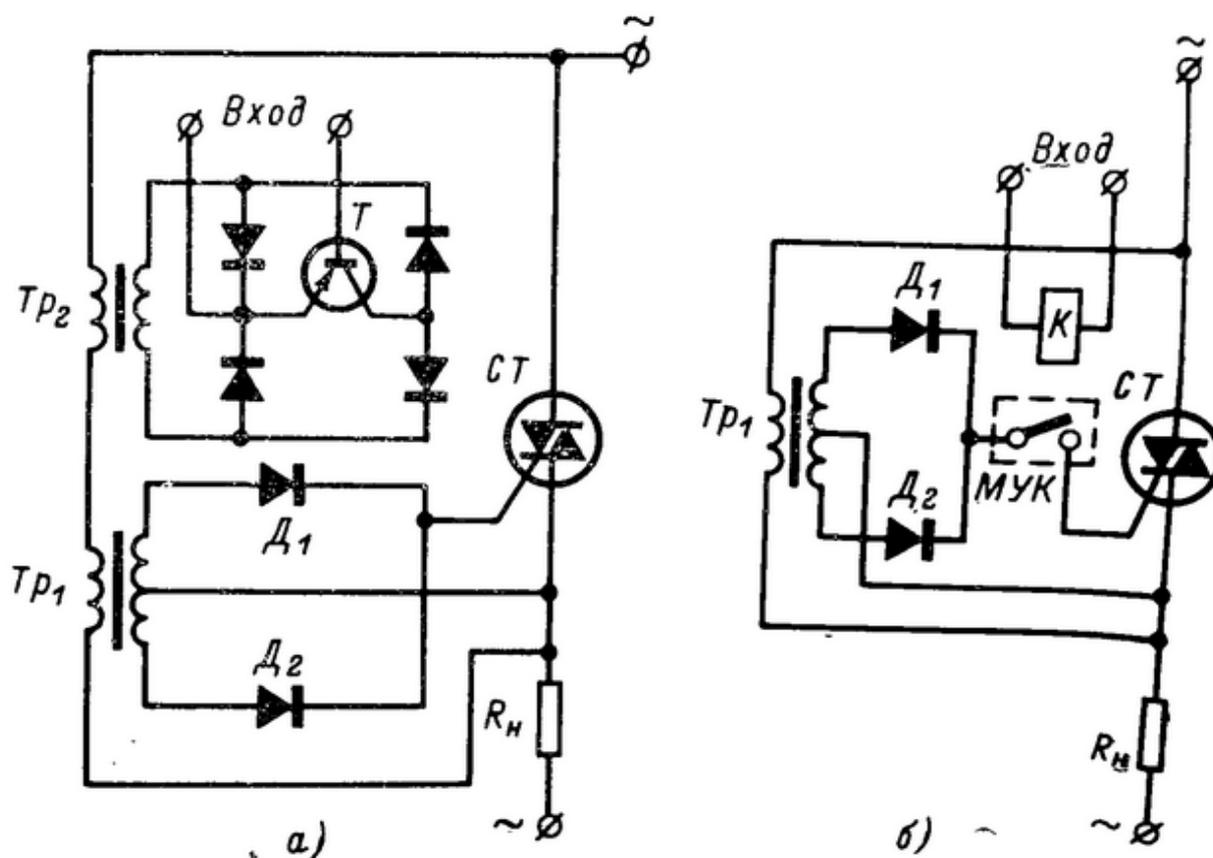


Рис. 6 Схемы управления симметричным тиристором.

В схеме на рис. 6,а в качестве ключа применен транзистор Т. В исходном состоянии все напряжение сети приложено к первичной обмотке трансформатора Тр2 и на управляющем электроде тиристора СТ сигнал отсутствует. При подаче на входные клеммы транзистора Т входного сигнала он открывается и закорачивает вторичную обмотку трансформатора Тр2. Все напряжение сети прикладывается к трансформатору Тр1 и через диоды Д1 и Д2 поступает на вход тиристора СТ. Тиристор СТ отпирается, и через нагрузку  $R_H$  начинает протекать ток: напряжение на трансформаторе Тр1 уменьшается, что приводит к исчезновению сигнала управления. Процесс отпирания тиристора СТ повторяется каждый полупериод питающего напряжения, обеспечивая на его входе сигнал управления положительной полярности.

В схеме, приведенной на рис. 6,б, для коммутации управляющего сигнала применен магнитоуправляемый контакт МУК.

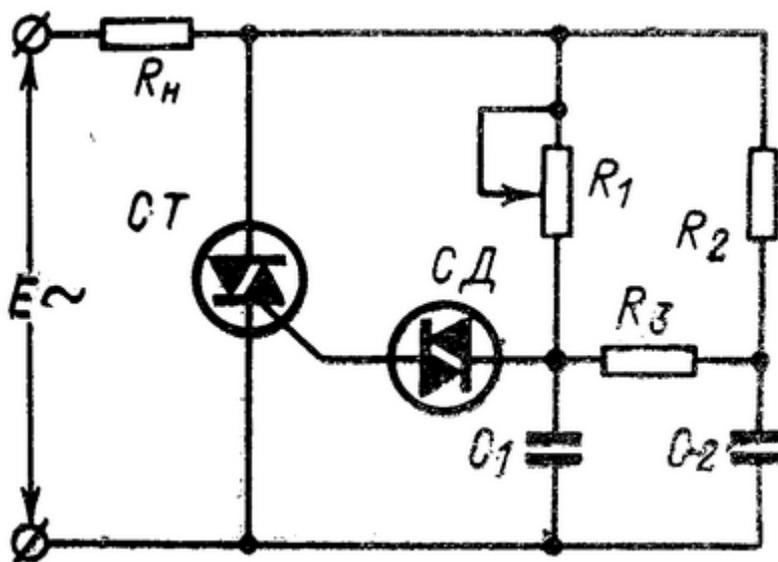


Рис. 7 Схема фазового управления симметричным тиристором.

На рис. 7 изображена двухполупериодная схема с управлением по фазе, которая предназначена для питания нагрузки переменным напряжением. В этой схеме применены основной — тиристор СТ и вспомогательный — диодный тиристор СД. С помощью тиристора СД осуществляется управление тиристором СТ импульсами различной полярности. Кроме того, тиристор СД позволяет уменьшить мощность рассеивания на управляющем электроде СТ в промежутках между импульсами. Полярность заряда конденсатора  $C_1$  меняется каждый полупериод. Обладая двухсторонней проводимостью, тиристор СД позволяет конденсатору  $C_1$  поочередно разряжаться. При положительной полуволне питающего напряжения на управляющий электрод тиристора СТ поступает положительный импульс и прибор переключается в первом квадранте вольтамперной характеристикой ( $U_C > 0$ ).

При изменении полярности приложенного напряжения переключение тиристора СТ происходит третьем квадранте его вольтамперной характеристики ( $U_C < 0$ ). Для уменьшения влияния нагрузки на фазосдвигающую цепь R1C1 в схему включен резистор R3. Для увеличения предела регулировки угла отпирания тиристора СТ параллельно цепи R1C1 включена вспомогательная цепь R2C2.

Для управления тиристорами применяются генераторы запускающих импульсов, схемы которых можно выполнить на транзисторах, двухбазовых и туннельных диодах, магнитных элементах, а также на маломощных тиристорах. Выбор ключевого элемента для генератора запускающих импульсов зависит от назначения схемы, а также от требований, предъявляемых к параметрам входного сигнала.

Рис. 8 Схемы формирования импульсов управления.

На рис. 8,а приведена схема релаксационного генератора, выполненная на двухбазовом диоде (однопереходном транзисторе).

Двухразовый диод имеет три вывода: эмиттер (Э), базу 1(Б1), базу 2(Б2). Участок между базами Б1 и Б2 имеет характер линейного омического сопротивления. При напряжении на эмиттере  $U_{\text{Э}}$ , меньшем некоторой максимальной величины  $U_{\text{Э.макс}}$ , переход эмиттер — база (Б1) смещен в обратном направлении и

двухбазовый диод закрыт. Для включения двухбазового диода необходимо выполнение следующих условий:  $U_{э} = U_{э.макс}$  и  $I_{э} > I_{э.макс}$ .

Рассмотрим работу схемы. От источника  $E$  конденсатор  $C$  заряжается через резистор  $R_1$ . Как только напряжение на эмиттере достигнет значения  $U_{э.макс}$ , диод ДБД открывается, а конденсатор  $C$  разряжается через сопротивление нагрузки  $R_H$ . Когда напряжение эмиттере достигнет величины  $U_{э} = U_{э.выкл}$ , ДВД перестает проводить. В дальнейшем цикл включения повторяется.

Резистор  $R_2$  защищает двухбазовый диод от перенапряжений и стабилизирует его работу при колебаниях температуры окружающей среды.

Резистор  $R_1$  выбирается из условия обеспечения необходимого тока для отпирания двухбазового диода, т.е. чтобы  $I_{э} > I_{э.макс}$ .

Сопротивление нагрузки  $R_H$  должно быть достаточно малым, чтобы напряжение  $U_H$ , обусловленное междубазовым током при закрытом диоде, не превышало напряжения, необходимого для отпирания тиристора, т. е.  $U_H \leq U_{у.мин}$ . С учетом этого условия сопротивление резистора  $R_H$  следует выбирать в соответствии с неравенством

$$\frac{R_H}{R_{б1б2} + R_2 + R_H} < U_{у.мин}$$

где  $R_{б1б2}$  — междубазовое сопротивление двухбазового диода.

На рис. 8,б приведена схема генератора импульсов.

В течение положительного полупериода питающего напряжения конденсатор  $C_1$  заряжается через диод  $D_1$  с постоянной времени  $\tau$ , которую можно регулировать с помощью потенциометра  $R_1$ . Напряжение, снимаемое с конденсатора  $C_1$ , одновременно выполняет две функции: является напряжением питания и служит сигналом управления. Транзисторы  $T_1$  и  $T_2$  представляют собой спусковую схему, которая включается при подаче напряжения с конденсатора  $C_1$ .

Когда открываются транзисторы, конденсатор  $C_1$  разряжается через них и через сопротивление нагрузки  $R_H$  и на выходе схемы формируется импульс. Передний фронт этого импульса определяется постоянной времени разряда конденсатора. Так как время разряда  $C_1$  много меньше полупериода питающего напряжения, после окончания работы спусковой схемы на конденсатор подается напряжение того же полупериода и он вновь заряжается. В случае если напряжение на конденсаторе  $C_1$  к концу повторного заряда будет больше или равно порогу срабатывания спусковой схемы, на нагрузке появится очередной импульс. В дальнейшем цикл включения повторяется.

Количество импульсов в пачке можно регулировать изменяя постоянную времени заряда. Увеличить импульсов в пачке можно также, изменив напряжение источника питания или величину емкости конденсатора С1.

Для управления мощными тиристорами, когда оказываются непригодными транзисторы, часто применяются схемы управления на маломощных тиристорах (рис. 8,в). В качестве накопителя энергии чаще всего используется искусственная линия из LC-звеньев, что позволяет получить на нагрузке близкую к прямоугольной форму импульса.

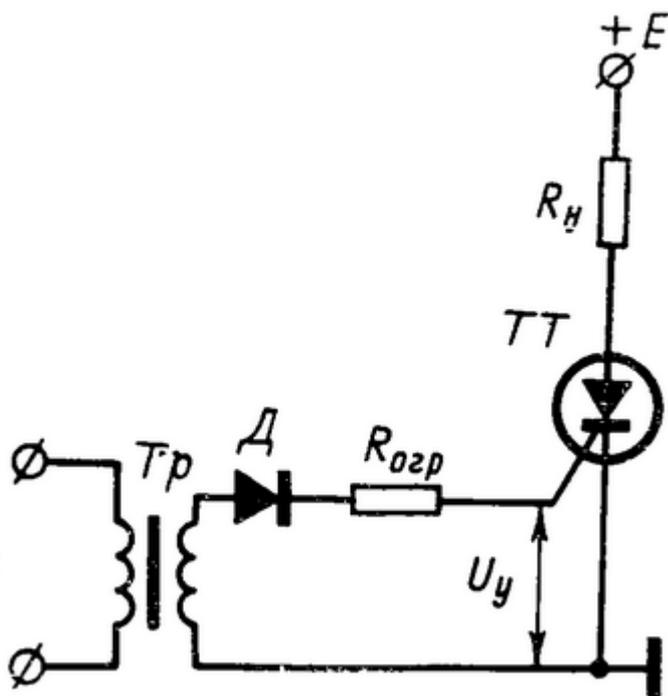


Рис. 9 Схема отпирания тиристора

В паузах между импульсами, когда тиристор заперт, конденсаторы формирующей линии ЛФ через зарядный дроссель L0 резонансно заряжаются до напряжения, приблизительно равного удвоенному значению напряжения источника питания. В момент подачи на управляющий электрод запускающего импульса тиристор ТТ отпирается, а линия ЛФ разряжается через нагрузку, формируя на ней близкий к прямоугольной форме импульс с параметрами, определяемыми характеристиками линии ЛФ. Для управления тиристорами часто применяют импульсные трансформаторы (рис. 9), которые хорошо обеспечивают развязку входной цепи приборов от генератора запускающих импульсов. С целью улучшения формы входного импульса в цепь управляющего электрода включают вспомогательные элементы.

Для отпирания тиристора с помощью импульсного трансформатора необходимо, чтобы напряжение  $U_y$  удовлетворяло условию  $U_y > R_{огр} I_{спр}$ , а длительность входного импульса  $t_y$  была бы большей времени  $t_{вкл}$ , т.е.  $t_y > t_{вкл}$ .

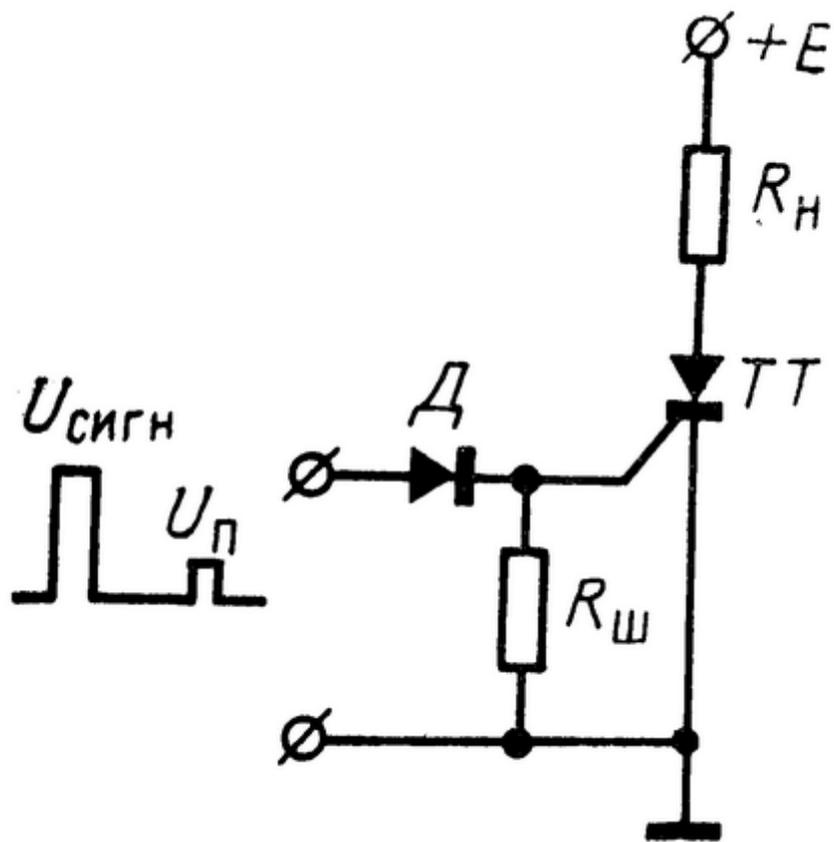


Рис. 10 Цепь отпирания триодного тиристора с кремниевым диодом во входной цепи

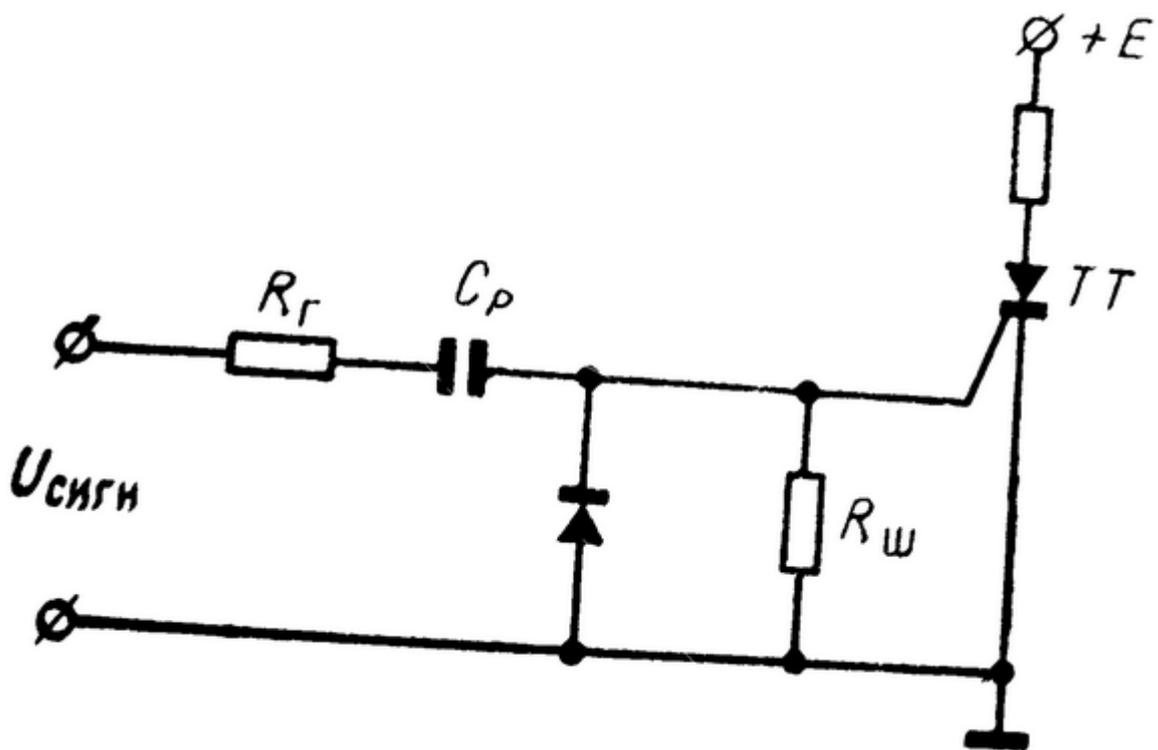


Рис. 11 Цепь отпирания триодного тиристора с разделительным конденсатором

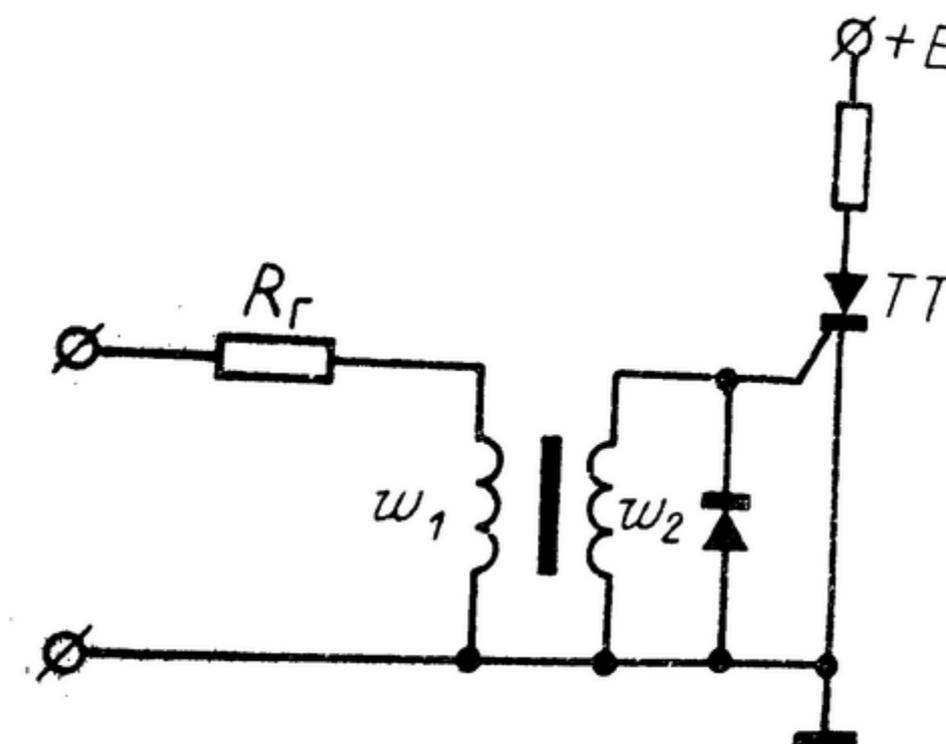


Рис. 12 Цепь отпирания триодного тиристора с импульсным трансформатором

### Запирание тиристорov

Для переключения тиристорov из проводящего состояния в запертое необходимо снизить анодный ток до величины, меньшей  $I_{выкл}$ , или подать на анод прибора импульс отрицательной полярности по отношению к катоду. Такие способы запирания характерны для диодных, триодных и симметричных тиристорov. Обычно в схему вводятся специальные элементы, обеспечивающие запирание тиристорov с помощью вспомогательных цепей прерывания тока, что характерно при питании схем от источника постоянного тока.

При использовании источника переменного тока запирание тиристорov осуществляется в момент перехода тока через нулевое значение.

Существуют многочисленные схемы, которые применяются для запирания тиристорov. Некоторые из них будут рассмотрены далее.

Основным способом, применяемым для запирания тиристорov, является использование коммутирующего конденсатора, который включается в анодную цепь тиристора, как показано на рис. 13, а.

Если тиристор ТТ2 отперт, конденсатор С заряжается через резистор R1 до напряжения источника с полярностью, указанной на рисунке. Когда отпирается тиристор ТТ1 напряжение конденсатора прикладывается к ТТ2, смещая его в обратном направлении. Постоянная времени RC выбирается достаточно большой, чтобы обратное напряжение сохранилось в течение времени, необходимого для запираания тиристора.

Рис. 13 Схемы запираания тиристора

В схеме на рис. 13,б запираание ТТ осуществляется за счет подключения параллельно тиристорному LC-контур. Когда тиристор заперт, конденсатор С заряжен до напряжения источника питания. В момент отпираания ТТ конденсатор С перезаряжается через индуктивность L и через полпериода собственной частоты контура

$$\omega_x = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

полярность его меняется на обратную. В следующий полупериод ток перезаряда конденсатора протекает через ТТ навстречу току нагрузки и, когда суммарный ток станет равным нулю, тиристор ТТ запрется.

В схеме, приведенной на рис. 13, в, запираение тиристора осуществляется импульсом, возникающим во вторичной обмотке трансформатора, включенного в катодную цепь прибора.

В схеме на рис. 13, г запираение тиристора осуществляется с помощью импульса тока от внешнего источника. В проводящем состоянии ток протекает через тиристор ТТ и нагрузку  $R_n$ . Для запираения тиристора на базу транзистора Т подается запускающий импульс. После открывания Т источник  $E_2$  оказывается приложенным к тиристор ТТ и запирает его. В этой схеме время включенного состояния транзистора должно быть равно времени твкл тиристора ТТ.