

В. А. СКАРЖЕПА

СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ НА ТИРИСТОРАХ



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАД · 1976

6Ф7.3

С 42

УДК 621.374.32

Рецензент *Е.Д. Колтик*

ВЛАДИМИР АНТОНОВИЧ СКАРЖЕПА

СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ НА ТИРИСТОРАХ

Редактор В. В. Лебедева
Художественный редактор Г. А. Гудков
Технический редактор В. И. Ботикова
Корректор Л. П. Горова

Сдано в набор 12/V 1976 г. Подписано к печати 24/VIII
1976 г. М-23140. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская
№ 2. Усл. печ. л. 6,3. Уч.-изд. л. 5,87. Тираж 12 000 экз.
Заказ № 1036. Цена 29 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия».
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при
Государственном комитете Совета Министров СССР по де-
лам издательств, полиграфии и книжной торговли, 196126,
Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.

Скаржепа В. А.

С 42 Счетчики импульсов на тиристорах. Л., «Энер-
гия», 1976.

120 с. с ил.

В книге дан анализ основных параметров и характеристик тиристорных схем с точки зрения применения их в счетных схемах. Приведена классификация методов построения таких схем. Анализируются основы построения счетных схем на триодных и запираемых тиристорах, тиристорных оптронах и реле. Приводятся схемы счетчиков с RC-связями, трансформаторными и чисто резистивными связями. Описаны основные методы расчета элементов схем счетчиков и методы повышения их помехоустойчивости и быстродействия.

Книга рассчитана на специалистов, работающих в области приборостроения, автоматки, вычислительной техники. Она может быть использована студентами соответствующих специальностей.

С $\frac{30306-159}{051(01)-76}$ 105-76

6Ф7.3

© Издательство «Энергия», 1976

ПРЕДИСЛОВИЕ

Счетчики импульсов на тиристорах находят все большее применение в устройствах промышленной автоматики, преобразовательной и вычислительной техники. Это объясняется как энергетическими и эксплуатационными характеристиками тиристоров, позволяющими коммутировать высокое напряжение и большой ток, так и простотой функциональных схем счетчиков. В преобразовательной технике и электроприводе счетчики на тиристорах используются для управления силовыми тиристорами, формирования закона преобразования и управления шаговыми двигателями. В логических устройствах автоматики и вычислительной техники они находят применение в качестве функциональных узлов, выполняющих различные операции преобразования информации. Наличие двух устойчивых состояний у тиристора, обеспечиваемое внутренней положительной обратной связью, упрощает счетчики и открывает перспективы для выполнения схем в твердом теле.

В настоящее время отдельные типы тиристорных счетных схем рассмотрены в ряде монографий [1, 5, 8, 9]. Однако систематизированное описание тиристорных счетчиков импульсов и принципов их построения, позволяющее детально с ними познакомиться и сделать обоснованный выбор той или иной схемы для решения конкретной задачи, отсутствует. Цель настоящей книги — восполнить этот пробел.

В книге рассмотрены основные характеристики тиристоров и их применение для построения тиристорных счетчиков, проведена детальная классификация тиристорных счетных схем и даны основные соотношения для их расчета.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Автор

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СЧЕТЧИКАХ ИМПУЛЬСОВ

1. Основные характеристики тиристоров

В основу тиристора положен монокристалл с чередующимися p - и n -переходами. Наиболее широко распространена четырехслойная $p-n-p-n$ -структура с тремя электродами (рис. 1, *a*). Анодом (A) служит внешняя дырочная область, катодом (K) — внешняя электронная, а управляющим электродом ($УЭ$) — внутренняя p -область. Наиболее яркой особенностью тиристорov являются их ключевые характеристики. Если в транзисторных схемах для построения устройств с двумя устойчивыми состояниями необходимо вводить внешнюю положительную обратную связь, то у тиристора этот режим обеспечивается собственной внутренней положительной обратной связью. Природа этой обратной связи наглядно иллюстрируется транзисторной схемой замещения, состоящей из двух полупроводниковых триодов: $ПТ 1$ и $ПТ 2$ (рис. 1, *б*) [11]. При приложении к тиристорy внешнего напряжения $p-n$ -переходы j_1 и j_2 оказываются прямосмещенными, а j_3 — обратносмещенным. Через тиристор протекает ток утечки, равный току утечки центрального $p-n$ -перехода (j_2) $I_{к0}$. Общее выражение для анодного тока имеет вид:

$$I = \frac{I_{к0} + \alpha_n I_y}{1 - (\alpha_p + \alpha_n)}, \quad (1)$$

где α_p и α_n — коэффициенты передачи постоянного тока транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$, составляющих многослойную структуру.

Исходя из этого уравнения, можно записать условие перехода $p-n-p-n$ -структуры в проводящее состояние:

$$\alpha_p + \alpha_n \geq 1. \quad (2)$$

При соблюдении этого условия знаменатель уравнения (1) обращается в нуль и ток через тиристор ограничивается исключительно элементами внешней цепи. Коэффициенты передачи α_p и α_n представляют собой слож-

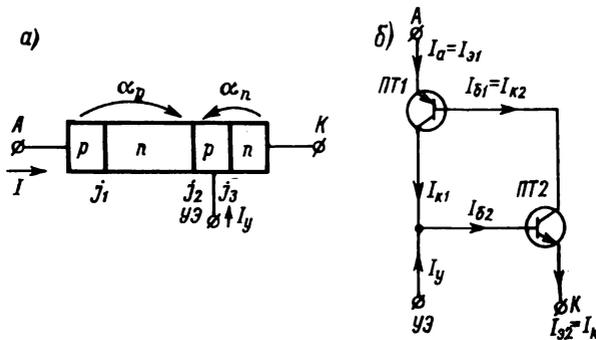


Рис. 1. Изображение четырехслойной трехэлектродной тиристорной структуры (а) и ее транзисторного аналога (б)

ные функции нескольких параметров. Основными из них являются ток, протекающий через $p-n$ -переход, световой поток, освещающий $p-n$ -переход, и температура $p-n$ -перехода. В обычных триодных тиристорах для управления используется первый параметр. При малой величине внешнего напряжения и нулевом токе управления коэффициенты α_p и α_n малы и их сумма значительно меньше единицы, поэтому $I \approx I_{к0}$. Тиристор надежно заперт. При увеличении анодного напряжения или тока управления коэффициенты α_p и α_n растут, приближаясь в сумме к единице, и в момент, когда $\alpha_p + \alpha_n = 1$, тиристор переключается. Через структуру протекает большой ток, обеспечивающий выполнение условия $\alpha_p + \alpha_n \gg 1$. При снятии управляющего воздействия тиристор остается в проводящем состоянии, так как выполнение условия (2) обеспечивается собст-

венным анодным током. Физика процессов переключения достаточно подробно рассмотрена в работах [5, 11]. Вольт-амперная характеристика триодного тиристора показана на рис. 2. Основными статическими параметрами, характеризующими тиристор, являются следующие точки вольт-амперной характеристики: ток включения $I_{\text{вкл}}$, ток выключения $I_{\text{выкл}}$, напряжение пере-

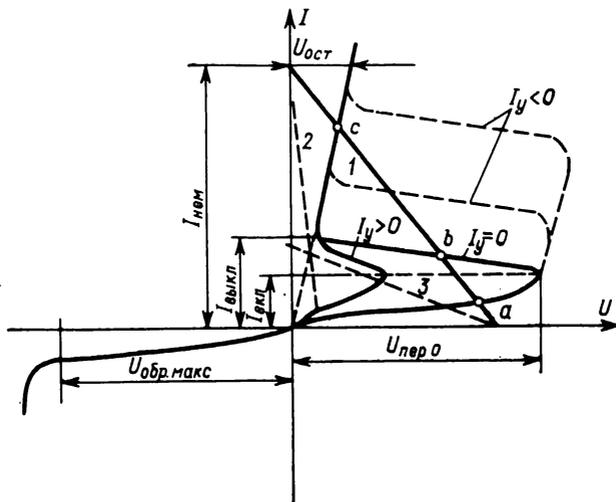


Рис. 2. Вольт-амперная анодная характеристика тиристора

ключения $U_{\text{пер } 0}$, определяемое при $I_y = 0$, и остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$, определяемое при номинальном анодном токе $I_{\text{ном}}$. В зависимости от своего назначения тиристоры могут работать в цепях постоянного тока, тогда не допускается коммутация обратного напряжения, и в цепях переменного тока, тогда величина допустимого обратного напряжения $U_{\text{обр. макс}}$ равна $U_{\text{пер } 0}$. Для работы тиристора с двумя устойчивыми состояниями необходимо, чтобы линия нагрузки I пересекала вольт-амперную характеристику в трех точках. В точке a тиристор заперт и ток через него равен току утечки. При переходе в рабочую точку c анодный ток тиристора определяется сопротивлением внешней цепи. Режим

в точке b является промежуточным, так как сопротивление тиристора отрицательно.

Процесс переключения тиристора в проводящее состояние характеризуется тем, что сумма его коэффициентов $\alpha_p + \alpha_n$ должна быть увеличена до единицы. В триодных тиристорах для этого необходимо увеличить ток через структуру до такой величины, чтобы увеличение

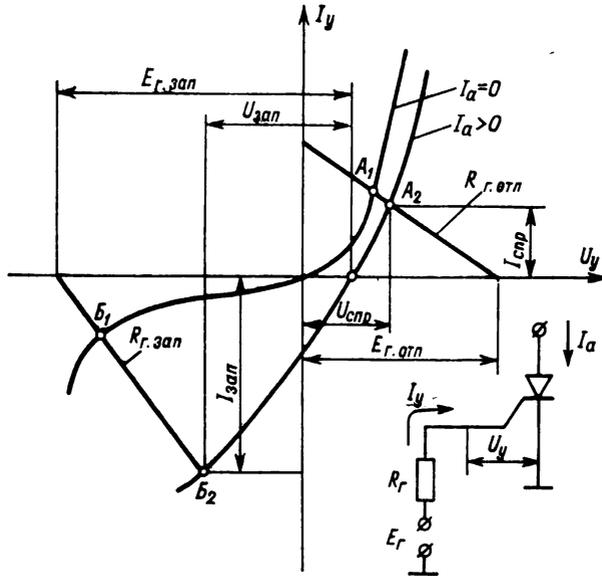


Рис. 3. Вольт-амперная входная характеристика тиристора

коэффициентов α_p и α_n удовлетворяло этому условию. Существуют два способа включения тиристора: по анодной цепи и по управляющей.

По анодной цепи тиристор можно включить, либо увеличив его анодное напряжение до величины, большей напряжения переключения $U_{пер 0}$, либо подав на анод импульс напряжения, скорость изменения которого выше допустимой. В первом случае ток утечки $I_{к0}$ увеличивается за счет увеличения анодного напряжения, а во втором — за счет увеличения емкостной составляющей тока, протекающего через центральный переход. Наличие емкости центрального перехода при

достаточно большой скорости изменения анодного напряжения приводит к тому, что переключение тиристора происходит при напряжении, значительно меньшем напряжения переключения. Необходимо отметить, что включение тиристорov по первому способу используется в качестве рабочего режима только для двухэлектродных $p-n-p-n$ -структур (диодных тиристорov). Включение тиристора из-за превышения допустимой скорости изменения анодного напряжения является нежелательным явлением и служит причиной ненадежной работы тиристорных схем.

Единственным практическим способом переключения трехэлектродной тиристорной структуры является включение по управляющему электроду. В этом случае управление осуществляется от низковольтного источника, резко уменьшается мощность управляющих сигналов, что объясняется усилением тока управления. Коэффициент усиления тока управления

$$K_y = \alpha_n / (1 - \alpha_n).$$

Учитывая, что в реальных четырехслойных $p-n-p-n$ -структурах $\alpha_p \ll \alpha_n$, уравнение (1) можно переписать в виде

$$I \approx I_y \alpha_n / (1 - \alpha_n), \quad (3)$$

а условие переключения (2) — в виде $\alpha_n \geq 1$.

Отсюда видно, что определяющее влияние на переключение тиристора оказывает коэффициент передачи управляющего $p-n$ -перехода α_n . Величина этого коэффициента существенно зависит от тока управления, поэтому, подавая небольшой ток управления, можно переключать значительный ток в анодной цепи. Как отмечалось выше, ток управления может быть в виде короткого импульса. Вольт-амперная характеристика входной цепи тиристора (рис. 3) отражает связь между током и напряжением управления, отличаясь от вольт-амперной характеристики одиночного $p-n$ -перехода, только тем, что через управляющий переход тиристора, кроме тока управления, протекает анодный ток. На рисунке введены обозначения: $E_{г. зап}$ и $E_{г. отп}$ — напряжения генератора импульсов соответственно запирающего и отпирающего, $R_{г. зап}$ и $R_{г. отп}$ — соответствующие внутренние сопротивления. При разомкнутой анодной

цепи ($I = 0$) входная вольт-амперная характеристика описывается уравнением последовательной цепочки, состоящей из p — n -перехода и активного сопротивления этого перехода. Когда тиристор открывается, ток анода увеличивается, переход j_3 еще больше смещается в прямом направлении и рабочая точка A_1 перемещается в точку A_2 по линии $R_{г. отп.}$

Максимальная возможная величина обратного тока управления зависит от состояния тиристора. Ток управления $I_{у. обр}$ закрытой структуры существенно ограничен (точка B_1 на рис. 3). Если тиристор отперт, то переход j_3 смещен в прямом направлении током анода. Поэтому величина $I_{у. обр}$ может изменяться в более широких пределах (точка B_2 на рис. 3) и ограничивается током запирания, при протекании которого структура переключается в закрытое состояние.

Основные параметры, характеризующие тиристор по управляющей цепи — напряжение спрямления $U_{спр}$ и ток спрямления $I_{спр}$, при которых на вольт-амперной характеристике тиристора исчезает участок отрицательного напряжения.

Важной динамической характеристикой тиристора является время включения $t_{вкл.}$. Это время определяет требуемую длительность входных импульсов для надежного включения структуры. Для уменьшения времени включения необходимо увеличивать амплитуду и крутизну управляющих импульсов. На время включения влияют также параметры анодной цепи. С ростом тока нагрузки и увеличением индуктивности в цепи нагрузки $t_{вкл.}$ увеличивается [10]. При активном характере нагрузки надежное включение тиристорov обеспечивается при длительности управляющих импульсов $t_y \geq 2t_{вкл.}$

Для выключения p — n — p — n -структуры необходимо уменьшить величину $\alpha_p + \alpha_n$ до значения, меньшего единицы. Этого можно добиться только уменьшением анодного тока до величины, меньшей тока выключения, при котором условие (2) не соблюдается. Для этого можно уменьшать напряжение в цепи с тиристором (см. линию 2 на рис. 2), увеличивать сопротивление в цепи тиристора (линия 3 на рис. 2) или прикладывать к тиристору обратное напряжение. Длительность процессов, происходящих при выключении тиристора, ха-

характеризуется временем выключения $t_{\text{выкл}}$. Время выключения обычных триодных тиристоров существенно больше времени включения, что объясняется длительностью процессов рассасывания избыточных носителей заряда в объеме баз. Время выключения определяется схемными факторами и температурой окружающей среды, увеличиваясь с ростом температуры, анодного тока, вновь прикладываемого анодного напряжения и скорости его нарастания, частоты переключений, величины индуктивности в анодной цепи. Время выключения уменьшается при увеличении отрицательного смещения на управляющем электроде и скорости спада анодного тока, росте обратного напряжения на тиристоре и скорости его нарастания.

При включении диода последовательно с тиристором при условии, что время восстановления диода меньше времени восстановления тиристора, диод ограничивает длительность протекания через тиристор обратного тока и $t_{\text{выкл}}$ тиристора резко возрастает. Оно также возрастает при прерывании прямого тока выключателем, когда к тиристорам не прикладывается обратного напряжения и $p-n$ -переходы очищаются от носителей зарядов за счет рекомбинации.

Для тиристорных, применяемых в счетчиках импульсов, важно соблюдать следующие соотношения параметров:

$$I_{\text{выкл}} > I_{\text{спр}}, \quad (4)$$

$$t_{\text{выкл}} > t_{\text{вкл}}. \quad (5)$$

Первое неравенство должно выполняться всегда, так как $I_{\text{выкл}} \approx \beta I_y$, где $\beta = \alpha_n / (1 - \alpha_n)$, т. е. управляющий ток базы входящего в структуру транзистора меньше коллекторного тока. Это соотношение хорошо подтверждается экспериментально для маломощных тиристорных. Однако с ростом мощности тиристорных неравенство (4) стремится к равенству. Так, у тиристорных средней мощности отношение $I_{\text{выкл}}/I_{\text{спр}}$ уменьшается до 1,5—2, а у тиристорных большей мощности становится даже меньшим единицы. Это наблюдается у всех приборов с площадью структуры $S = 5 \div 10 \text{ мм}^2$ [11].

Условие (5) соблюдается для всех типов тиристорных независимо от мощности. Отношение $t_{\text{выкл}}/t_{\text{вкл}}$ обычно имеет величину порядка 10. У специальных типов

быстродействующих тиристоров это отношение уменьшается до 2—3. Поэтому в схемах, где учитывается условие (5), желательно выбирать тиристоры с большим временем выключения.

2. Разновидности тиристорных структур

На базе четырехслойной $p-n-p-n$ -структуры, рассмотренной в § 1, создан целый ряд полупроводниковых ключевых приборов: диодный тиристор, триодный незапираемый тиристор с управлением по катоду, триодный незапираемый тиристор с управлением по аноду, триодный запираемый тиристор с управлением по катоду, триодный запираемый тиристор с управлением по аноду, тетродный тиристор, фототиристор, тиристорный оптрон и фототиристорный переключатель. Основные разновидности тиристорных структур показаны на рис. 4.

В зависимости от назначения тиристорного счетчика импульсов, схемных требований, электрических и частотных возможностей применяются те или иные тиристорные структуры.

Диодные тиристоры (Д) (рис. 4, *a*) характеризуются наличием двух электродов: анода и катода. Управление диодными тиристорами осуществляется импульсом положительного или отрицательного напряжения, подаваемого на анод или катод прибора соответственно. Вольт-амперная характеристика диодного тиристора соответствует характеристике (см. рис. 2) при $I_y = 0$. Электрические и частотные параметры такой управляемой тиристорной структуры близки к соответствующим параметрам триодных тиристоров.

Триодные незапираемые тиристоры (Т) (рис. 4, *b* и *в*) составляют наиболее широкий класс многослойных полупроводниковых приборов. В зависимости от того, из какой области сделан вывод управляющего электрода, триодные тиристоры делятся на управляемые по катоду и управляемые по аноду. Для первых в управляющую цепь необходимо подавать положительный управляющий сигнал, а для вторых — отрицательный. Триодные тиристоры с управлением по катоду применяются в схемах, имеющих общую точку на минусовой шине источника питания. В этом случае их нагрузки включаются в анодные цепи тиристоров, управление осуществляется

от источника положительных импульсов и сопротивление цепи нагрузки не оказывает влияния на генератор управляющих импульсов. Триодные тиристоры с управлением по аноду работают от генераторов отрицательных управляющих импульсов. Они являются перспективными при использовании в схемах с $p-n-p$ -транзисторами. Вольт-амперные характеристики триодных тиристоров с управлением по катоду показаны на рис. 2 при $I_y \geq 0$.

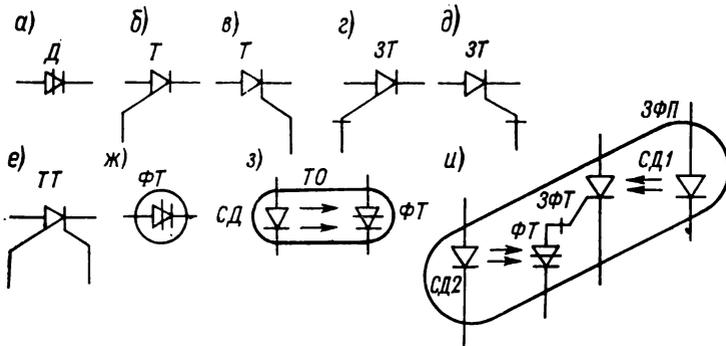


Рис. 4. Графическое обозначение тиристорных структур

Триодные запираемые тиристоры (ЗТ) (рис. 4, г и д) разработаны специально для цепей постоянного тока. Если незапираемые тиристоры выключаются по силовой цепи прерыванием анодного тока на время выключения, то запираемые тиристоры выключаются импульсом по управляющей цепи. Для ЗТ с управлением по аноду в качестве выключающего используется импульс положительной полярности, а для ЗТ с управлением по катоду — отрицательной. Вольт-амперные характеристики ЗТ с управлением по катоду в диапазоне токов управления $I_y \geq 0$ показаны на рис. 2. Согласно этим характеристикам при увеличении отрицательного тока управления ток выключения прибора растет и при достаточно большой амплитуде тока управления оказывается больше анодного тока тиристора. Если длительность импульса этого тока управления больше времени выключения, то запираемый тиристор выключается. Включение и выключение по управляющему электроду

увеличивает схемную универсальность запираемых тиристоров, снижает мощность схем управления и повышает быстродействие тиристорных схем. По цепи выключения запираемый тиристор характеризуется коэффициентом управления запирающим, который представляет собой отношение выключаемого анодного тока к соответствующему значению тока в цепи управления и может быть выражен через коэффициент передачи тока:

$$K_{\text{у. зап}} = \frac{I}{I_{\text{у. зап}}} = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \alpha_p - 1}.$$

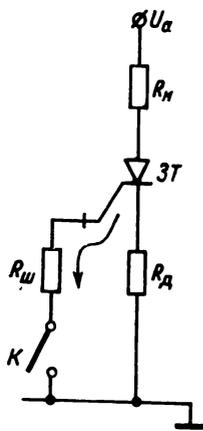


Рис. 5. Схема ключа на запираемом тиристоре с шунтированием управляющего перехода

Если ток управления при включении незначительно зависит от тока нагрузки, то ток управления при выключении является функцией, существенно зависящей от величины анодного тока. Это объясняется зависимостью коэффициентов α_p и α_n от тока. Так как соблюдение условия включенного состояния запираемого тиристора значительно зависит от коэффициента передачи α_n , то для выключения по цепи управляющего электрода переход j_3 шунтируют внешним резистором (рис. 5). При замыкании ключа K часть тока тиристора, протекающего через переход j_3 , ответвляется в цепь резистора

$R_{\text{ш}}$, коэффициент передачи α_n уменьшается. При этом условие включенного состояния тиристора нарушается, и он запирается. Этот способ выключения удобен тем, что не требует дополнительных источников разнополярных импульсов.

Тетродный тиристор (ТТ) (рис. 4, е) — это четырехслойный прибор, имеющий выводы от всех четырех слоев. Управление может осуществляться как по первой, так и по второй базе. Входные вольт-амперные характеристики тетродного тиристора являются характеристиками N -типа, т. е. эквивалентны характеристикам туннельных диодов. Благодаря наличию двух управляющих электродов резко возрастает универсальность прибора. Кроме того, четвертый вывод может обеспечить умень-

шение времени рассасывания носителей в n -базе подачей запирающего напряжения, что повышает помехоустойчивость и быстродействие $p-n-p-n$ -структуры.

Фототиристор (ФТ) (рис. 4, ж) представляет собой четырехслойную структуру, управляемую излучением. При освещении полупроводника в нем возникают электронно-дырочные пары, участвующие в увеличении тока через прибор. Мощность светового потока, необходимого для переключения, существенно зависит от глубины залегания переходов под поверхностью полупроводника, от скорости поверхностной рекомбинации и возрастает с увеличением длины волны света.

Преимущества фототиристоров проявляются там, где необходима электрическая изоляция между управляющим сигналом и силовой цепью или где включение обеспечивается световым излучением. На уровень излучения, необходимый для запуска фототиристора, влияет температура структуры и разброс параметров по анодному напряжению от прибора к прибору. Точный запуск фототиристора во времени требует значительного усиления светового потока с большой скоростью его нарастания. Такие сигналы можно получить от лазеров и светоиспускающих диодов. Наиболее ярко достоинства фототиристоров проявляются в паре со светодиодами.

Тиристорным оптроном (ТО) (рис. 4, з) называется интегральная схема, включающая в себя полупроводниковые элементы: инфракрасный излучатель (светодиод из арсенида галлия) и фотоприемник (кремниевый фототиристор).

Такой прибор имеет токовый вход и токовый выход и оптическую связь между управляющей и силовой цепью. Это позволяет осуществить гальваническую развязку входа и выхода оптрона. В этом отношении оптроны наиболее близки к электромеханическим реле, контактные группы которых полностью изолированы от цепи обмотки реле. Высокая надежность и помехозащищенность оптической связи выгодно отличает ее от гальванической, а гальваническая развязка входных и выходных цепей повышает схемную универсальность прибора.

Запираемый фотопереклюатель (ЗФП) (рис. 4, и) представляет собой более сложную интегральную схему. В отличие от тиристорного оптрона, использующего

оптическую связь только для включения элемента, запираемый фотопереключателъ и выключается световым импульсом. Такая интегральная схема, выполненная в одном корпусе, содержит запираемый фототиристор $ЗФТ$, в управляющую цепь которого включен диодный фототиристор $ФТ$, причем каждый из них переключается светодиодом $СД1$ или $СД2$ соответственно. Запираемый фотопереключателъ имеет два входа (электроды светодиодов $СД1$ и $СД2$). При протекании тока через $СД1$ $ЗФП$ включается. При поступлении сигнала на $СД2$ включается фототиристор $ФТ$, заземляя управляющий электрод $ЗФТ$ и выключая его. Наличие двух электрически развязанных входов в $ЗФП$ значительно расширяет его функциональные возможности.

Все рассмотренные выше разновидности тиристорных структур находят применение в схемах счетчиков импульсов, но наиболее широко используются триодные тиристоры. Это объясняется тем, что они серийно выпускаются промышленностью.

3. Особенности работы тиристоров в счетчиках импульсов

Учитывая, что в счетчиках импульсов тиристор работает в ключевом режиме и сохраняет длительное время одно из устойчивых состояний (открытое или запертое), можно рассмотреть четыре этапа его работы в схеме: 1) установившийся режим, когда тиристор заперт; 2) переходный режим при переносе информации, когда тиристор заперт; 3) переходный режим при переносе информации, когда тиристор отперт; 4) установившийся режим, когда тиристор отперт. Надежность сохранения тиристором своего состояния в каждом из этих этапов работы определяет надежность функционирования всей схемы в целом.

Так как для экономичности работы схемы значение единицы присваивается включенному, а нуля — выключенному состоянию, то подавляющее большинство тиристоров в схеме счетчика всегда выключено. В наиболее часто используемой схеме тиристорного счетчика — распределителя — во включенном состоянии всегда находится только один разряд, который по мере поступления управляющих импульсов сдвигается влево или вправо.

Поэтому на надежность работы таких схем определяющее влияние оказывает надежность сохранения тиристором запертого состояния.

В установившемся режиме на запертый тиристор оказывают влияние два основных фактора: импульсное изменение питающего напряжения со скоростью dU/dt и самопроизвольное включение. Влияние первого фактора рассмотрено в § 1, а природа второго заключается в следующем. При неизменном напряжении и достаточно высокой температуре ток через некоторые тиристоры медленно увеличивается, а затем происходит переход тиристора в открытое состояние — тиристор самопроизвольно включается. Самопроизвольное включение происходит тем быстрее, чем выше окружающая температура и напряжение, прикладываемое к тиристорам. Кроме того, в установившемся режиме в некоторых схемах счетчиков через управляющий электрод запертых тиристоров протекает ток статической помехи $I_{\text{пом. ст}}$, который, хотя и много меньше, чем ток спрямления, существенно ухудшает надежность сохранения тиристором запертого состояния. В ряде типов тиристоров в паспортных данных указывается максимальная допустимая величина тока помехи $I_{\text{пом. ст}}$, однако и при соблюдении условия $I_{\text{пом. ст}} < I_{\text{пом. макс}}$ трудно гарантировать надежную работу тиристорного счетчика при комплексном влиянии рассмотренных выше факторов без применения специальных мер по повышению помехоустойчивости.

Рассмотренные вредные влияния на запертый тиристор усиливаются в переходном режиме, при переносе информации. В зависимости от типа схемы добавляются следующие дестабилизирующие факторы. Влияние скорости нарастания анодного напряжения увеличивается, так как, если в установившемся режиме броски питающего напряжения составляют часть полного напряжения, определяемую динамическими характеристиками источника питания, то в переходном режиме к запертым тиристорам скачкообразно прикладывается полное напряжение питания. Вследствие того что коммутация осуществляется полупроводниковыми ключами, скорость нарастания этого напряжения велика и может служить причиной включения запертых тиристоров. Помимо этого, через управляющие электроды запертых

тиристором протекает ток динамической помехи $T_{\text{пом. дин}}$, который существенно превышает ток статической помехи.

В открытом состоянии тиристор имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем запертый. Единственной причиной, способной вызвать его выключение, является уменьшение анодного тока до величины, меньшей тока выключения. Если не учитывать возможность прерывания анодного питания, то можно считать, что в установившемся режиме на включенный тиристор оказывает влияние только уменьшение анодного напряжения при условии, что нагрузкой тиристора является индуктивность, зашунтированная обратновключенным диодом. В этом случае через тиристор протекает обратный ток, способный в определенных условиях выключить его. В переходном режиме влияние этой помехи несущественно для нормальной работы счетчика, так как по логике работы подобных схем в течение этого режима ранее открытые тиристоры по окончании переходных процессов должны все равно перейти в запертое состояние.

Существенным для надежной работы тиристора является ограничение скорости нарастания его анодного тока di/dt . Особенно это важно в тиристорном счетчике с емкостной нагрузкой. При превышении этим параметром допустимого значения происходит местный перегрев кристалла и «игольчатый прокол», приводящий к разрушению прибора.

Проведенный анализ показывает, что для надежной работы тиристорных счетчиков необходимо применять специальные меры как по обеспечению паспортных режимов работы тиристорных схем, так и по устранению влияния помех, возникающих в результате работы схемы. Применяемые при этом методы можно разделить на два класса: режимные и схемные.

Режимные методы предусматривают такой расчет пассивных элементов схемы, при котором в процессе работы не превышались бы допустимые (паспортные) значения параметров тиристорных схем при самых неблагоприятных сочетаниях внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, возникающих в процессе эксплуатации схемы. Кроме того, при выборе типа тиристора напряжение переключения $U_{\text{пер } 0}$ необходимо по

возможности выбирать с двух-трехкратным и большим запасом. Это существенно увеличивает стабильность работы тиристорного ключа в запертом состоянии.

Схемные методы предусматривают такое проектирование схемы, при котором, выбирая соответствующую схему счетчика, можно исключить определенные виды помех или в существующей схеме компенсировать влияние этих помех с помощью дополнительных элементов. Стабильность работы схем счетчиков и методы ее повышения будут рассмотрены ниже. Надежность же работы самого тиристорного ключа можно повысить следующими схемными методами: 1) выбором анодного или катодного включения нагрузки, 2) шунтированием управляющего электрода, 3) отрицательным смещением на управляющем электроде.

Более чувствительной к возмущающим факторам является схема с анодным включением нагрузки. При включении нагрузки в катодную цепь мощность необходимого управляющего сигнала увеличивается. Это объясняется как увеличением входного сопротивления тиристора на величину, равную сопротивлению нагрузки R_n , так и отрицательной обратной связью, препятствующей процессу включения. Действительно, в связи с тем что процесс включения определяется нарастанием тока через тиристор, необходимо поддерживать управляющий сигнал до полного включения тиристора. Для катодного включения нагрузки этот сигнал, не являясь постоянным, определяется уравнением:

$$U_y = U_{вх} - R_n I(t),$$

где U_y — напряжение между управляющим электродом и катодом тиристора, $U_{вх}$ — входное напряжение тиристорного ключа, $I(t)$ — анодный ток тиристора.

Напряжение спрямления тиристорного ключа с катодной нагрузкой увеличивается по сравнению с паспортным значением согласно формуле:

$$U_{спр. к} = \lambda U_{спр. а}, \quad (6)$$

где $U_{спр. а}$ и $U_{спр. к}$ — напряжения спрямления тиристорного ключа с анодной и катодной нагрузкой соответственно, λ — коэффициент пропорциональности.

Для отечественных маломощных тиристорov $\lambda = 1,5 \div 2,5$.

Эффективными методами повышения стабильности тиристорного ключа являются шунтирование управляющего перехода и введение отрицательного смещения. Эти меры вызывают в цепи управляющего электрода протекание обратного тока $I_{y.обр}$. При шунтировании управляющего перехода ток $I_{y.обр}$ является частью тока анода, ответвляющейся в цепь шунта.

Кроме того, сопротивление шунта уменьшает чувствительность тиристора к управляющему сигналу, что

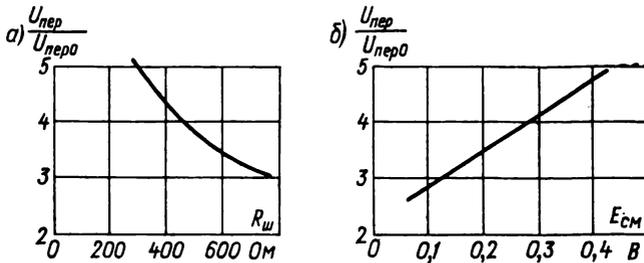


Рис. 6. График зависимости относительного напряжения переключения от сопротивления, шунтирующего управляющий переход (а), и отрицательного смещения на управляющем переходе (б)

повышает его помехоустойчивость по цепи управляющего электрода.

Графики, иллюстрирующие изменение относительного напряжения переключения, показаны на рис. 6.

Отрицательное смещение можно подать от общего дополнительного источника смещения, общей цепи смещения и индивидуальной цепи смещения в управляющих электродах каждого тиристора. В схеме на рис. 7, а [1] конденсатор C цепи управления заряжается током управляющего импульса, а за время между импульсами разряжается через управляющий электрод тиристора. Условие работы этой схемы:

$$f_{имп} \geq \frac{1}{(3 \div 5) \tau},$$

где $\tau = CRR_{вн}/(R + R_{вн})$, $R_{вн}$ — внутреннее сопротивление тиристора.

В статическом режиме стабильность тиристорного ключа увеличивается при трансформаторном управле-

нии. В этом случае управляющий электрод оказывается короткозамкнутым по постоянному току.

Высокую помехоустойчивость по параметру dU/dt имеют тетродные тиристоры [4]. Так как отпирание тиристора при скачках анодного напряжения происходит в результате заряда емкости C центрального $p-n$ -перехода j_2 , этот эффект не проявится, если емкость будет заряжена еще до того, как на аноде тиристора появится скачок напряжения. Первый способ, позволяю-

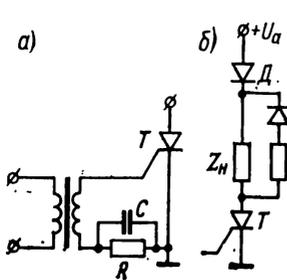


Рис. 7. Схемы повышения помехоустойчивости тиристора по управляющему электроду (а) и по анодной цепи (б)

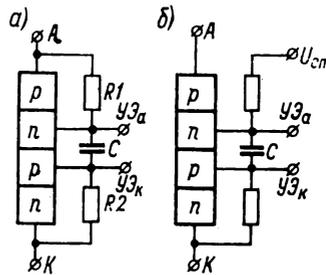


Рис. 8. Схемы повышения стабильности тетродного тиристора по параметру dU/dt с помощью шунтирующих резисторов (а) и источника смещения (б)

щий ослабить эффект большой скорости нарастания анодного напряжения dU/dt , заключается в том, что между анодным управляющим электродом и анодом, а также между катодным управляющим электродом и катодом включаются соответственно резисторы R_1 и R_2 (рис. 8, а), создавая цепь заряда емкости C . При этом повышается помехоустойчивость тиристора и по цепи управляющего электрода. При втором способе изменение анодного напряжения совершенно не сказывается, так как емкость C центрального перехода предварительно заряжают до напряжения выше анодного от специального источника с напряжением U_{cp} , как это изображено на рис. 8, б. Поэтому к тиристор можно прикладывать анодное напряжение с бесконечно большой скоростью нарастания. Однако в такой схеме анодное напряжение может быть подано на тиристор лишь

через некоторый промежуток времени после включения вспомогательного источника, необходимый для заряда емкости C .

Для устранения запираания тиристорного ключа при скачкообразном уменьшении анодного напряжения в схемах с индуктивным характером нагрузки последняя подключается к источнику питания через диод D (рис. 7, б). Этот диод препятствует протеканию обратного тока через тиристор и исключает возможность сбоя схемы.

К вопросу выбора и проектирования тиристорных счетчиков необходимо подходить таким образом, чтобы разрабатываемая схема была принципиально надежной, ее работа сопровождалась минимумом статических и динамических помех, служащих источником нестабильности. При наличии этих помех существенным является разделение их во времени, так как суммарное воздействие на схему нескольких возмущений резко снижает надежность ее работы.

4. Схемы коммутации тиристоров

Если в установившемся режиме работы тиристорного счетчика необходимо обеспечить надежную работу тиристорного ключа в одном из устойчивых состояний — отпертом или запертом, то в переходном режиме возникает дополнительная задача — включать новые тиристоры, определяемые логикой работы схемы, и выключать ранее включенные. В соответствии с этим необходимо обеспечить условия надежного включения и выключения тиристоров. Так как большинство типов тиристорных структур включается по управляющей цепи, а выключается по анодной, то цепи включения и выключения разделены и должны быть рассмотрены раздельно.

Основные условия надежного включения тиристоров [5]:

$$U_y \geq U_{\text{спр}} + R_\Gamma I_{\text{спр}}, \quad (7)$$

$$(U_y - U_{\text{спр}})/R_\Gamma < I_{y, \text{ макс}}, \quad (8)$$

$$t_y f_y U_y^2 / R_\Gamma < P_{y, \text{ макс}}, \quad (9)$$

где U_y , t_y , f_y — напряжение, длительность и частота поступления входных сигналов; R_r — внутреннее сопротивление генератора управляющих сигналов; $I_{y. макс}$ и $P_{y. макс}$ — максимальные допустимые ток и мощность, рассеиваемая в цепи управляющего электрода.

Соблюдение условия (7) гарантирует включение тиристора; соблюдение (8) и (9) ограничивает ток и мощность входного сигнала для предотвращения разрушения цепи управляющего электрода. Входная характери-

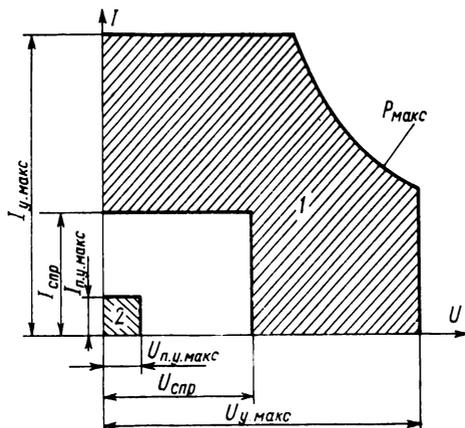


Рис. 9. Семейство входных характеристик тиристора

стика тиристора показана на рис. 9. Область 1 надежного включения тиристора заштрихована. Сверху и справа область этих параметров ограничивается линиями максимальных допустимых тока и напряжения цепи управления и максимальной рассеиваемой мощности, снизу — током и напряжением спрямления. Заштрихованная область 2 ограничивается линиями максимальных допустимых тока и напряжения помехи в цепи управления. Если рабочая точка сигнала помехи лежит в этой области, то гарантируется запертое состояние тиристора при соблюдении значений ограничивающих параметров по анодной цепи. Надо отметить, что в ряде типов тиристоров отсутствует ограничение на величину максимальной допустимой помехи. Для них следует

принимать меры, исключающие протекание тока помехи через управляющий электрод.

В зависимости от схемы счетчика тиристоры могут включаться потенциальным или импульсным управляющим сигналом. Потенциальное управление обеспечивает надежное включение тиристора независимо от

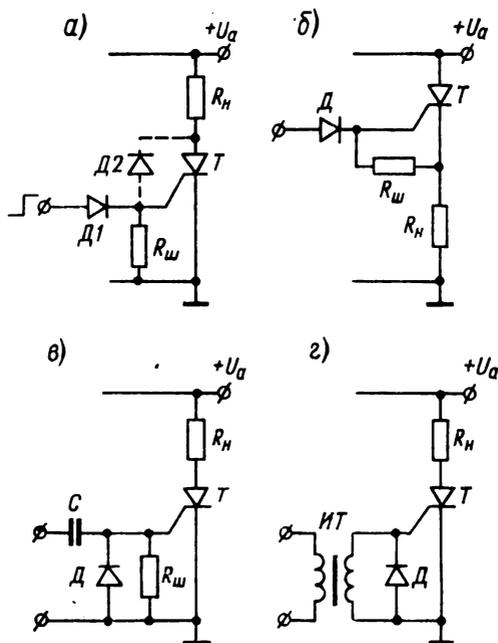


Рис. 10. Основные схемы включения тиристоров

характера нагрузки, но при этом необходимо принимать меры для ограничения управляющего тока после включения тиристора. В схемах с анодной нагрузкой для этой цели применяется диод D_2 , включенный между анодом и управляющим электродом тиристора (рис. 10, а). Этот диод шунтирует управляющую цепь после включения тиристора T . Однако генератор управляющего сигнала остается нагруженным. В схеме с катодным включением нагрузки (рис. 10, б) этот недостаток отсутствует. После включения тиристора T потенциал на катоде диода D возрастает до потенциала напряжения

питания и диод закрывается, отключая источник управления. Потенциальное управление используется в счетчиках с резистивными и непосредственными связями между разрядами. Такие схемы очень перспективны для интегрального исполнения.

Импульсное управление используется в счетчиках с реактивными элементами в цепях связи. Достоинством его является возможность управления короткими импульсами, при котором уменьшается мощность, затрачиваемая на управление, однако возрастают требования к длительности импульса управления при индуктивном характере нагрузки. При коротком импульсе ток в анодной цепи не успевает вырасти до величины, большей тока выключения, и по окончании импульса тиристор возвращается в запертое состояние. Для устранения этого явления приходится увеличивать длительность импульса или вводить дополнительно активную составляющую анодного тока. Для этого параллельно нагрузке включается дополнительный резистор, величина сопротивления которого выбирается из условия:

$$R_d \leq (U_a - U_{\text{ост}}) / I_{\text{вкл}}. \quad (10)$$

В зависимости от вида реактивного элемента импульсные цепи управления могут быть емкостными и индуктивными (рис. 10, *в* и *г*). Диод *D* предохраняет управляющий переход от обратного напряжения.

Метод управления определяет характер помех, возникающих в цепи управляющего электрода. При потенциальном управлении основными являются статические помехи, при импульсном — импульсные. Характер помех определяет метод борьбы с их влиянием.

Выключение тиристорov является задачей более трудной, чем включение. Это объясняется тем, что в основном для выключения применяются схемы коммутации по анодной цепи. Кроме того, так как тиристорная структура находится в состоянии глубокого насыщения, время выключения существенно больше времени включения. Поэтому частотные свойства тиристорных счетчиков определяются временем переходных процессов в коммутационных цепях выключения. Оно складывается из времени выключения тиристора ($t_{\text{выкл}}$) и времени восстановления состояния коммутирующих элементов ($t_{\text{вос}}$).

Методы запираания тиристоров можно разделить на два класса: 1) запираание по анодной цепи, 2) запираание по цепи управляющего электрода. Первый метод используется для всех разновидностей тиристорных структур, кроме запираемых тиристоров и фототиристорных переключателей, второй — для структур, управляемых по цепи управляющего электрода.

Первый метод можно, в свою очередь, разбить на два: выключение прерыванием анодного тока и принудительную коммутацию. Выключение прерыванием анодного

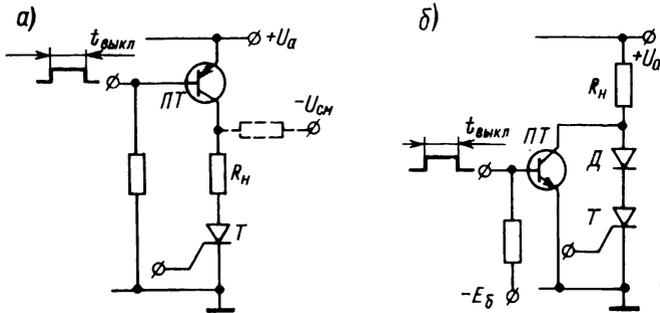


Рис. 11. Схемы выключения тиристоров последовательным (а) и параллельным (б) полупроводниковыми ключами

тока заключается в уменьшении анодного тока через тиристор до величины, меньшей тока выключения. Это можно выполнить с помощью транзистора, включенного последовательно с тиристором (рис. 11, а) или параллельно ему (рис. 11, б). К недостаткам этого метода следует отнести большое время выключения тиристора (так как рассасывание избыточных носителей происходит исключительно путем рекомбинации в базовых областях) и высокие значения dU/dt на зажимах тиристора. Однако, так как время восстановления коммутирующего элемента практически отсутствует, частотные свойства этой схемы высокие. Дополнительное смещение в схеме на рис. 11, а и диод Д в схеме на рис. 11, б служат для повышения надежности выключения тиристорov с малым током выключения.

Принудительная коммутация, в свою очередь, делится на два вида: искусственную и естественную. Ис-

кусственная коммутация состоит в подключении к тиристорам источника напряжения с обратным знаком. Таким источником может быть дополнительный источник напряжения, предварительно заряженный конденсатор или LC-контур. В зависимости от вида этого источника

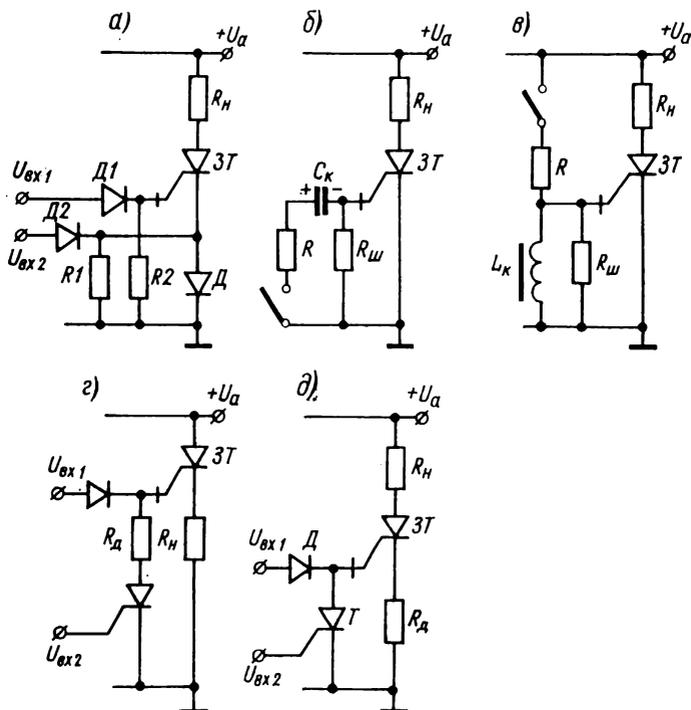


Рис. 12. Основные схемы выключения запираемых тиристоров

схемы принудительной коммутации делятся на пять классов: 1) схема самокоммутации тиристора за счет резонансного характера нагрузки в его цепи, 2) схема самокоммутации тиристора с помощью вспомогательного LC-контюра, 3) схема коммутации с помощью конденсатора или LC-контюра, подключаемого другим силовым тиристором, 4) схема коммутации с помощью конденсатора или LC-контюра, подключаемого вспомогательным тиристором, 5) схема коммутации с помощью импульсов тока от внешнего источника.

Схемы искусственной коммутации и расчет их параметров подробно рассмотрены в работах [5, 17].

Естественная коммутация имеет место в счетчиках, работающих в цепях переменного напряжения. Выключение тиристора происходит при перемене полярности питающего напряжения.

Преимущества запираемых тиристорov и выполненных на их основе фототиристорных переключателей состоят в том, что коммутация их производится полностью по цепи управляющего электрода. Для запираания этих приборов используются следующие методы: 1) коммутация разнополярных импульсов, поступающих в управляющую цепь (рис. 12, а), 2) подключение предварительно заряженного конденсатора или индуктивности к управляющему электроду (рис. 12, б и в), 3) подключение управляющего электрода к минусу источника питания (рис. 12, г и д).

Амплитуда запирающего импульса в схеме на рис. 12, а выбирается из условия [5]:

$$U_{\text{вх2}} > U_a \frac{R_{\text{обр}} + R_2}{K_{\text{у. зап}} R_{\text{н}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{обр}}$ — обратное сопротивление управляющего перехода, $K_{\text{у. зап}}$ — коэффициент усиления тиристора по цепи запираания.

Параметры коммутирующих элементов, являющихся источником отрицательного импульса в цепи управляющего электрода при замыкании ключа K в схеме на рис. 12, б и размыкании ключа K в схеме на рис. 12, в, определяются из следующих формул [5]:

для схемы на рис. 12, б

$$R = \frac{U_a - U_{\text{зап}}}{2,7 (I_{\text{зап}} + U_{\text{зап}}/R_{\text{ш}})}, \quad (12)$$

$$C_{\text{к}} \geq \frac{t_{\text{у. обр}}}{R + R_{\text{ш}} U_{\text{зап}} / (I_{\text{зап}} R_{\text{ш}} + U_{\text{зап}})}; \quad (13)$$

для схемы на рис. 12, в

$$R = \frac{U_a}{2,7 (I_{\text{зап}} + U_{\text{зап}}/R_{\text{ш}})}, \quad (14)$$

$$L_{\text{к}} \geq t_{\text{у. обр}} \frac{R_{\text{ш}} U_{\text{зап}}}{I_{\text{зап}} R_{\text{ш}} + U_{\text{зап}}}, \quad (15)$$

где $t_{y.обр}$ — длительность импульса, которой соответствует значение тока $I_{зап}$ или заданное значение коэффициента запириания $K_{y.зап} = I/I_{зап}$; $U_{зап}$, $I_{зап}$ — напряжение и ток импульса, запирающего тиристор.

Для схем на рис. 12, *г* и *д* величина сопротивления резистора R_d определяется из условий:

для схемы на рис. 12, *г*

$$U_a/(I_{ном} - I) - R_{обр} < R_d < (K_{y.зап} - 1) R_n - R_{обр}, \quad (16)$$

где $I_{ном}$ — наибольший анодный ток, при котором возможно запириание по цепи управляющего электрода; I — текущее значение анодного тока;

для схемы на рис. 12, *д*

$$R_d > R_c/(K_{y.зап} - 1). \quad (17)$$

Рассмотренные схемы выключения запираемых тиристоров отличаются значительно меньшей мощностью, чем схемы для незапираемых тиристоров, так как управление происходит по маломощной цепи и с повышенным быстродействием. Особенно перспективен в этом отношении метод, состоящий в подключении управляющего электрода тиристора к минусу источника питания (рис. 12, *г* и *д*). Для таких схем мощность запирающих импульсов даже меньше, чем отпирающих, так как они поступают на вход маломощного тиристора (или транзистора). Потери на $3T$ минимальны, так как запирающий ток прекращается в момент запириания тиристора.

5. Классификация и принципы построения тиристорных счетчиков импульсов

Тиристорные счетчики импульсов, несмотря на относительную простоту схем, имеют значительное число разновидностей. Тем не менее, структурную схему одного разряда любого счетчика можно представить в виде последовательно соединенных элементов: двоичной ячейки, цепи переноса и цепи коммутации. Двоичная ячейка в подавляющем числе схем состоит из одного тиристора и резистивных элементов, обеспечивающих ток через тиристор, больший по величине, чем ток выключения. Тиристор выполняет роль ключевого элемента и устройства памяти в течение времени между двумя управляющими импульсами, изменяющими

состояние схемы. Цепь переноса предназначена для передачи информации из младшего разряда счетчика в старший при поступлении управляющего сигнала. Цепь коммутации необходима для выключения тиристора младшего разряда после передачи информации в старший разряд.

Все многообразие схем тиристорных счетчиков можно классифицировать следующим образом: 1) по выполняемым функциям, 2) по типу применяемой многослойной структуры, 3) по количеству активных элементов на разряд, 4) по способу переноса сигнала в следующий разряд, 5) по виду цепи переноса, 6) по виду цепи коммутации, 7) по числу тактов, 8) по универсальности, 9) по принципу работы.

По выполняемым функциям тиристорные счетчики делятся на десятичные (распределители), двоичные, накопительные, регистры сдвига и многофазные мульти-вibrаторы. Наибольшее распространение получили десятичные счетчики, так как они потребляют минимум энергии и имеют наиболее простую схему. В двоичных счетчиках, как правило, используется два активных элемента на разряд. Накопительные счетчики имеют повышенные потери энергии, особенно при большом числе разрядов, поскольку по мере поступления входных импульсов число включенных разрядов увеличивается. Правда, так как необходимость в выключении младших разрядов отсутствует, коммутирующие элементы в схеме устраняются, упрощая ее. Тем не менее накопительные счетчики используют только в специальных схемах, причем в большинстве случаев в реверсивном исполнении. Регистры сдвига могут выполняться и на одном, и на двух активных элементах в разряде. На одном активном элементе выполняются схемы регистров с реактивными цепями переноса, причем в момент коммутации информация о состоянии регистра запоминается в элементах цепей переноса. Другими словами, в таких схемах используется способ переноса, состоящий в выключении предыдущих разрядов. Два активных элемента используются в схемах с резистивными цепями переноса. Такие схемы выполняются многотактными. Сдвиг записанного числа осуществляется обычно в два такта. Само число записывается в нечетные разряды двухтактного регистра. При сдвиге числа на разряд информация

переписывается в четные разряды (первый такт), затем— в нечетные разряды более высокого порядка (второй такт). Такой метод называется косым сдвигом. Несмотря на использование двух активных элементов в каждом разряде и двух тактов при сдвиге числа, схемы с резистивными цепями переноса имеют более высокую помехоустойчивость и быстродействие и сравнимы с однотактными по сложности, потому что в них отсутствуют реактивные элементы, в которых переходные процессы уменьшают быстродействие схем, являясь причиной внутренних помех. Многофазные мультивибраторы применяются в ограниченном числе схем и могут выполняться либо в виде кольцевого распределителя с генератором управляющих сигналов на входе, либо в виде последовательной цепи одновибраторов, включенных в кольцо. Второй способ более универсален, так как позволяет получить различную длительность импульсов в фазах путем настройки одновибраторов на различную длительность выходного импульса.

В зависимости от применяемой многослойной структуры тиристорные счетчики могут выполняться на диодных тиристорах, триодных тиристорах, запираемых тиристорах, фототиристорах, тиристорных оптронах и фототиристорных переключателях. Схемы на диодных тиристорах достаточно полно рассмотрены в работе [4]. Принципы построения схем на приборах остальных разновидностей сходны между собой и будут рассмотрены дальше.

В зависимости от выбранной схемы в тиристорном счетчике используется в каждом разряде один или два активных элемента. Большинство схем выполняется с одним активным элементом в разряде. Это упрощает схему и уменьшает ее стоимость. Однако в некоторых типах десятичных счетчиков с реактивными связями, во всех многотактных схемах сдвиговых регистров, в двоичных счетчиках и в некоторых схемах реверсивных десятичных счетчиков приходится использовать два активных элемента в каждом разряде. При этом имеются в виду активные элементы, включенные в двоичную ячейку. С учетом активных элементов в цепях переноса и коммутации их число может быть больше двух.

По способу переноса информации из разряда в разряд тиристорные счетчики делятся на два типа: с выключо-

чением предыдущего разряда и с включением последующего. Первый способ применяется в схемах с реактивными цепями переноса, так как при выключении открытого тиристора предыдущего разряда необходимо хранить информацию о состоянии счетчика в цепи переноса. Для этого используется энергия, накопленная индуктивностью, или напряжение на конденсаторе, включенном в цепь переноса. Параметры реактивных элементов подбираются так, чтобы за время выключенного состояния тиристором ток через индуктивность или напряжение на конденсаторе существенно не менялись. Выключение тиристором счетчика осуществляется обычно разрывом цепи питания всей схемы. После восстановления питания в соответствии с состоянием цепей переноса включаются разряды, следующие за ранее включенными. Схемы, построенные по первому способу, относительно просты, так как имеют одну общую цепь выключения. Они обладают широкими функциональными возможностями, работая в режиме десятичного счетчика, регистра сдвига, накопительного счетчика. Недостатком этих схем является повышенная мощность цепи выключения, особенно в регистре сдвига, так как тиристоры выключаются по цепи питания. В качестве цепи выключения могут использоваться полупроводниковые ключи, RC - и LC -цепи. Перенос информации по второму способу осуществляется в схемах с любым типом цепей переноса. Порядок включения последующих разрядов определяется состоянием тиристором предыдущих разрядов. В одноктактных схемах включенное состояние тиристора предыдущего разряда приводит к отпиранию ключа цепи переноса, соединяющего управляющий электрод тиристора следующего разряда с общей шиной управления. В качестве ключей могут использоваться диоды, транзисторы и маломощные тиристоры. В многотактных схемах общие шины управления отсутствуют. Информация в следующий разряд передается подключением части анодного тока предыдущего разряда к управляющему электроду тиристора старшего разряда. Выключение ранее проводившего тиристора осуществляется цепью выключения, коммутируемой при отпирании тиристора в разряде, следующем за включенным разрядом.

Цепи переноса в тиристорных счетчиках могут быть следующих видов: конденсаторная, индуктивная, транс-

форматорная, резистивная и активная. Конденсаторные и индуктивные цепи переноса просты по схеме, универсальны, но имеют существенный недостаток, заключающийся в низкой помехоустойчивости. Так как состояния цепи переноса определяется энергией, накопленной в реактивных элементах цепи переноса, скачки питающего напряжения приводят к изменению величины этой энергии по цепям, включающим в себя цепи управления запертых тиристоров. При этом через управляющие электроды протекает ток помехи, приводящий к сбоям в работе схемы. Кроме того, необходимость восстановления или разряда напряжения в конденсаторах и индуктивностях увеличивает время переходного процесса и снижает быстродействие счетчиков. Трансформаторные цепи переноса имеют повышенную помехоустойчивость, обеспечивают гальваническую развязку разрядов, однако отличаются плохой технологичностью вследствие использования импульсных трансформаторов. Применение активных ключевых элементов в цепях переноса несколько усложняет схему, но обеспечивает высокую помехоустойчивость и значительно снижает требования к мощности и качеству управляющего сигнала.

По виду цепи коммутации тиристорные счетчики делятся на схемы с общей и с индивидуальной цепью выключения. Общая цепь выключения используется в счетчиках, работающих по принципу выключения предыдущего разряда. В качестве таких цепей могут быть использованы последовательно включенный со счетчиком размыкающий управляемый ключ, отключающий питание в схеме на время, большее времени выключения тиристоров, и колебательная LC - или RC -цепь, обеспечивающие в переходном режиме подключение обратного напряжения к тиристорам счетчика в течение времени, достаточного для выключения тиристоров. В многотактных счетчиках выключение проводящих тиристоров осуществляется коммутацией тактовых шин с помощью ключевых элементов. Первый способ обеспечивает максимальное быстродействие, так как наибольшая задержка, вносимая элементами цепи выключения, приблизительно равна времени выключения тиристоров. При коммутирующих LC - и RC -цепях необходимо дополнительно учитывать время восстановления коммутирующих элементов. Индивидуальные цепи выключения

применяются в каждом разряде и имеют такой же принцип построения, как и общие цепи. Отличием их является меньшая мощность, так как они предназначены для выключения только одного разряда. Более существенным недостатком индивидуальных коммутирующих *LC*- и *RC*-цепей является то, что они служат источником внутренних помех, снижающих надежность работы схемы. Действительно, так как коммутирующие элементы включаются между соседними разрядами, в момент коммутации меняется напряжение не только в элементах соседних разрядов, но и во всех реактивных коммутирующих элементах счетчика. Это приводит к дополнительному заряду этих элементов через управляющие электроды тиристоров или к их разряду на источник питания, что может быть причиной включения внеочередных тиристоров или выключения проводящих тиристоров. Кроме того, большие индуктивности и емкости коммутирующих элементов требуют больших токов перезаряда, которые приводят к уменьшению быстродействия схемы и к большим потерям энергии.

По числу тактов тиристорные счетчики делятся на одноктактные и многотактные. Одноктактные схемы содержат реактивные элементы в цепях переноса. Многотактные схемы строят преимущественно с резистивными цепями переноса. В этих схемах управление и коммутация осуществляются поочередным подключением тактовых шин к источнику питания. Частотные свойства таких счетчиков определяются исключительно частотными свойствами тиристоров. Информация от разряда к разряду переносится подключением анодного тока открытого тиристора к управляющей цепи закрытого тиристора следующего разряда. Нагрузка многотактных схем включается или в цепях анодов, или в цепях катодов тиристоров. Многотактные схемы по виду коммутируемых шин делятся на следующие виды: 1) схемы с анодной коммутацией, в которых поочередно подключаются к плюсу источника питания анодные тактовые шины, а общей является отрицательная шина, 2) схемы с катодной коммутацией, в которых поочередно подключаются к минусу источника питания катодные тактовые шины, а общей является положительная шина, 3) схемы с комбинированной коммутацией, в которых коммутируются и катодные и анодные шины.

Независимо от места включения нагрузки и вида коммутируемых шин цепь переноса включается между катодом тиристора предыдущего разряда и управляющим электродом следующего. В тиристорных счетчиках с анодными нагрузками после включения следующего разряда необходимо обеспечить выключение тиристора предыдущего разряда дополнительными способами, так как анодный ток этого тиристора после отключения от источника питания соответствующей тактовой шины проходит по новой цепи, образованной цепью переноса к следующему разряду. Для выключения этого тиристора существуют два метода: 1) использование преобладания тока выключения $I_{\text{выкл}}$ над током спрямления $I_{\text{спр}}$ и времени выключения над временем включения $t_{\text{вкл}}$, 2) применение комбинированной коммутации.

Оба эти способа не являются оптимальными, так как в первом случае необходим отбор тиристорov по параметрам $I_{\text{выкл}}$ и $I_{\text{спр}}$, а во втором усложняется схема управления. Поэтому многотактные схемы желательно выполнять с катодными нагрузками. В них выключение тиристора предыдущего разряда обеспечивается автоматически при включении тиристора следующего разряда, так как потенциал катода включенного ранее тиристора становится равным потенциалу источника питания.

По принципу работы тиристорные счетчики делятся на статические и динамические. К статическим относятся схемы, работающие в режиме ожидания. К динамическим относятся схемы, частота переключения которых определяется параметрами цепи переноса или особенностью источника питания. Яркими представителями динамических схем первого типа являются многофазные мультивибраторы. К характерным разновидностям схем второго типа относятся счетчики, питающиеся от сети переменного напряжения. Их преимущество заключается в отсутствии специальных источников питания, так как они работают непосредственно от промышленной сети.

По универсальности тиристорные счетные схемы делятся на нереверсивные и реверсивные. Последние могут осуществлять пересчет как в прямом, так и в обратном направлении. Подавляющее число реверсивных пересчетных схем содержит один активный элемент в двоичной ячейке. Отличие от нереверсивной схемы

заключается в дополнительной цепи переноса, соединяющей управляющий электрод тиристора предыдущего разряда с силовой цепью тиристора следующего разряда. Реверс пересчета осуществляется по одному из следующих методов:

1. Запускаются управляющие импульсы в цепь прямого либо обратного переноса. Метод применяется в схемах с конденсаторными или трансформаторными цепями переноса.

2. Применяются управляемые ключи в цепях переноса. Направление сдвига определяется замыканием ключей прямого и обратного пересчета.

3. Коммутируются тактовые шины прямого или обратного пересчета в схеме управления. При этом необходима специальная схема реверса пересчета, которая, подключая те или иные тактовые шины, определяет это направление.

4. Коммутируются анодные шины прямого и обратного пересчета к источнику питания. Как и предыдущий, этот метод требует схемы реверса пересчета. В схеме, построенной по этому методу, в каждой двоичной ячейке используется два тиристора.

5. Изменяется порядок коммутации тактовых шин в многотактных схемах.

Схемы, в которых используется четвертый метод, требуют специального отбора тиристорov по параметрам управляющей цепи. Наиболее перспективны схемы с управляемыми ключами в цепи переноса, так как содержат минимум элементов, простую схему реверса пересчета, имеют максимальный к. п. д. и не требуют подбора элементов.

ГЛАВА ВТОРАЯ

НЕРЕВЕРСИВНЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ НА ТРИОДНЫХ ТИРИСТОРАХ

6. Особенности работы функциональных ячеек в тиристорном счетчике

Основным звеном тиристорного счетчика является двоичная ячейка. Совместно с цепями переноса и коммутации она составляет разрядную ячейку. Число разряд-

ных ячеек счетчика равно числу разрядов. Все разрядные ячейки одного счетчика имеют одинаковые схемы, поэтому при расчете достаточно определить параметры элементов одного разряда. Большое число разновидностей схем счетчиков приводит к многообразию схем разрядных ячеек. Некоторые из них достаточно подробно рассмотрены в работе [7]. При соединении разрядных ячеек в схему счетчика проявляется ряд особенностей, не имеющих места в изолированной ячейке. Эти особенности объясняются связями, возникающими в результате компоновки счетчика импульсов, через общие элементы коммутации и цепи переноса. Наиболее ярко они проявляются в счетчиках импульсов на триодных тиристорах с конденсаторными цепями переноса и коммутации, реализующими при переносе информации принцип включения последующего разряда и выключения предыдущего разряда. Классические схемы таких счетчиков показаны на рис. 13 [5].

Схема на рис. 13, *a* является типичным кольцевым распределителем импульсов, работающим по принципу включения последующего разряда. Каждая разрядная ячейка имеет свои цепи коммутации и переноса. Пусть, например, включен тиристор T_n . При этом коммутирующие конденсаторы емкостью C_k , соединенные с анодом этого тиристора, заряжаются до напряжения $U_a - U_{ост}$. Потенциалы катодов всех диодов D цепей переноса, кроме среднего, равны напряжению питания, и диоды заперты. Все конденсаторы цепей переноса емкостью C_n заряжены до напряжения питания, кроме среднего, который разрядился через открытый тиристор T_n . При поступлении очередного управляющего импульса протекает ток только через средний конденсатор связи и управляющую цепь тиристора T_{n+1} , включая его. Средний конденсатор емкостью C_k оказывается при этом подключенным параллельно открытому тиристору T_n с напряжением обратного знака. Начинается его перезаряд от напряжения $-(U_a - U_{ост})$ до напряжения $+(U_a - U_{ост})$ через сопротивление нагрузки второго разряда. Если время перезаряда этого конденсатора до нулевого значения напряжения выбрать большим, чем время выключения тиристора T_n , то он выключится и по окончании переходных процессов будут заперты все тиристоры, кроме T_{n+1} , что соответствует

продвижению информации на один разряд. Если в разрядной ячейке процессы ограничиваются вышеописанными, то в тиристорном счетчике из-за наличия связей между ячейками через конденсаторы емкостью C_k происходит изменение потенциала анодов всех тиристоров, объясняющееся изменением напряжения на коммути-

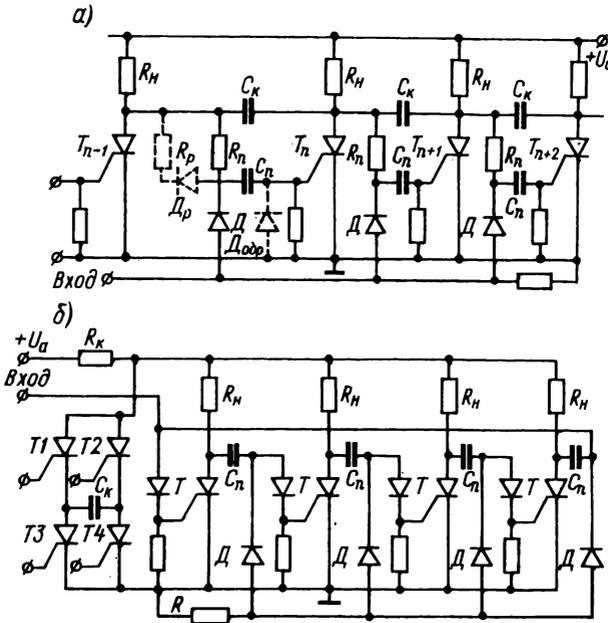


Рис. 13. Схемы счетчиков импульсов с переносом информации методами включения последующего (а) и выключения предыдущего (б) разряда

рующих конденсаторах первого и второго разряда через все сопротивления нагрузки, причем максимальное изменение потенциала наблюдается на аноде тиристора T_{n-1} и определяется уравнением [5]

$$U_{a. n-1} = U_a \left(1 - 1,618e^{-\frac{2,618t}{R_H C_k}} + 0,618e^{-\frac{0,382t}{R_H C_k}} \right). \quad (18)$$

При восстановлении напряжения на аноде T_{n-1} через цепь переноса (R_n, C_n) протекает ток помехи. Этот ток

определяет внутреннюю импульсную помеху. Так как он протекает через управляющую цепь ранее включенного тиристора, влияние его еще усиливается, что может привести к ложному отпиранию тиристора T_n . Величина этого тока [5]

$$I_{\text{пом}} = \frac{U_a (R_n C_k / \tau_n + 1)}{R_n [R_n C_k / \tau_n + \tau_n / (R_n C_k) - 3]} e^{-t/\tau} + \frac{U_a}{R_n} \left[\frac{4,235}{R_n C_k / \tau_n - 2,618} e^{-2,618t / (R_n C_k)} - \frac{0,235}{R_n C_k / \tau_n - 0,382} e^{-0,382t / (R_n C_k)} \right], \quad (19)$$

где $\tau_n = R_n C_n$.

Для защиты схемы от действия внутренней помехи необходимо увеличивать сопротивление R_n или отношение $R_n C_k / \tau_n$ [5]. Однако при этом снижается быстродействие счетчика. При увеличении R_n возрастает время перезаряда конденсатора емкостью C_n , а уменьшать его за счет уменьшения емкости конденсатора емкостью C_n недопустимо, так как затрудняется отпирание тиристора входным импульсом из-за дифференцирования последнего. Увеличение емкости конденсатора C_k не только снижает быстродействие, но и увеличивает габариты устройства. Некоторое увеличение сопротивления R_n можно получить, не ухудшая частотных свойств схемы при включении разрядной цепочки R_p , D_p и обратновключенного диода $D_{\text{обр}}$, уменьшающих τ_n , однако при этом увеличивается мощность управляющих импульсов.

Минимальную емкость конденсаторов цепей коммутации и переноса можно определить из уравнений:

$$C_{\text{к. мин}} = \frac{t_{\text{выкл}}}{R_n \ln [(U_a - U_{\text{ост}}) / U_a]}, \quad (20)$$

$$C_{\text{п. мин}} = \frac{2t_{\text{вкл}}}{R_{\text{вх}} \ln [U_y / (R_{\text{вх}} I_{\text{спр}})]}, \quad (21)$$

где U_y — амплитуда управляющих входных импульсов, $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление тиристорного ключа.

Внутренние помехи в схеме на рис. 13, б возникают из-за общей цепи коммутации, состоящей из тиристоров

$T1—T4$ и цепи R_k, C_k . Эта схема более универсальна по сравнению с предыдущей, так как может работать в режиме кольцевого распределителя и сдвигового регистра для любого кода. Управление схемы осуществляется импульсами, подаваемыми поочередно в управляющие цепи тиристоров $T1, T4$ и $T2, T3$. Пусть в исходном состоянии включен тиристор T первого разряда, а конденсатор емкостью C_k заряжен через тиристоры $T1, T4$ до напряжения питания. Все конденсаторы цепей переноса емкостью C_n заряжены до напряжения питания, кроме первого, который разрядился через отпертый тиристор. С приходом управляющих импульсов на тиристоры $T2, T3$ напряжение на конденсаторе емкостью C_k подключается к схеме счетчика со знаком, противоположным знаку питающего напряжения. Начинается перезаряд конденсатора через сопротивление R_k . Одновременно под действием этого обратного напряжения через диоды D происходит некоторый разряд конденсаторов емкостью C_n . К моменту разряда конденсатора емкостью C_k до нулевого напряжения тиристор T первого разряда успевает закрыться и по мере роста напряжения другого знака на конденсаторе емкостью C_k в цепях переноса разрядных ячеек начинает протекать ток. Так как конденсатор емкостью C_n второго разряда был разряжен, максимальный ток протекает в управляющей цепи второго тиристора, включая его. Через управляющие цепи всех остальных тиристоров протекает ток импульсной помехи. Отношение помехи к полезному сигналу управления можно найти из уравнения [5]:

$$U_{\text{пом}}/U_y = I_{\text{пом}}/I_y = e^{-(t_1-t_2)\tau_k}, \quad (22)$$

где t_1, t_2 — соответственно время разряда и заряда конденсаторов цепей переноса, $\tau_k = R_k C_k$.

Значение t_1 и t_2 определяется из условий:

$$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln \frac{\tau_1}{\tau_2} t_1 < \frac{\tau_2 \tau_k}{\tau_2 - \tau_k} \ln \frac{\tau_2}{\tau_k},$$

где $\tau_1 = C_n [(n-1)R + R_n]$, $\tau_2 = C_n (nR + R_n)$, n — число разрядов счетчика,

$$t_2 < \tau_2 \ln 2.$$

Для уменьшения сигнала помехи необходимо либо уменьшать постоянную времени цепи коммутации, либо увеличивать постоянную времени цепи связи. Минимальную величину емкости конденсатора C_k можно найти из уравнения (20), подставляя вместо сопротивления R_n сопротивление R_k . Его значение можно определить из соображения минимума потерь в схеме:

$$R_k = (0,1 \div 0,2) R_n.$$

Минимальная емкость цепи переноса определяется уравнением (21) при условии, что $R_{вх}$ увеличивается на величину сопротивления R_n . Уменьшение помехи возможно только путем увеличения емкости конденсатора C_n , однако при этом снижается быстродействие схемы. Так, при $U_{пом}/U_y < 0,1$ максимальная частота работы счетчика $f_{макс} = 2$ кГц.

Влияние общих цепей коммутации и переноса сказывается не только на помехоустойчивости схемы, но и на ее быстродействии. Для схемы на рис. 13, а это влияние заключается в следующем.

1. Коммутирующий конденсатор, связывающий два каскада кольцевой схемы, предназначен для выключения лишь первого из них в направлении счета. В соответствии с этим заряд конденсатора емкостью C_k через тиристор T_{n-1} можно считать полезным, обеспечивающим последующую коммутацию, а заряд через тиристор T_n — вредным, увеличивающим время накопления необходимого полезного заряда.

2. При кольцевой схеме счетчика время одного цикла работы кольца для каждого коммутирующего конденсатора можно разделить на два такта. В течение первого такта конденсатор накапливает полезный заряд, в течение второго происходит коммутация с участием этого конденсатора. За время второго такта происходит накопление заряда «вредного» направления. Остальное время, т. е. $n-2$ такта, конденсатор теряет полученный в последнем из двух рабочих тактов «вредный» заряд, разряжаясь на схему. К моменту следующей коммутации с его участием конденсатор емкостью C_k в случае достаточно длинного кольца даже приобретает некоторый полезный заряд.

Минимальный допустимый период работы многоразрядного счетчика

$$T_{\text{мин. сч}} = T_{\text{мин}} - t_{\text{выкл}} - \tau_{\text{к}} \ln \frac{1}{U_{\text{а}} - U_{\text{ост}}}, \quad (23)$$

где $T_{\text{мин}}$ — минимальный допустимый период работы двухразрядного счетчика [5].

Из выражения (23) видно, что величина $T_{\text{мин. сч}}$ многоразрядного счетчика как минимум на величину $t_{\text{выкл}}$ меньше периода двоичного счетчика.

Таким образом, из вышесказанного можно заключить, что при включении разрядных ячеек в схему счетчика возникают новые связи через общие элементы схемы, что приводит к появлению импульсных помех. Для борьбы с ними необходимо увеличивать постоянные времени коммутирующих цепей и цепей переноса. Это резко снижает быстродействие счетных схем, что не может быть компенсировано некоторым повышением частоты работы кольцевых многоразрядных схем по сравнению с изолированной разрядной ячейкой. Однако даже за счет снижения быстродействия не удастся уменьшить токи импульсной помехи до нуля. Поэтому в схемах счетчиков, где применяются тиристоры без гарантированного максимального тока помехи, надежную работу нельзя обеспечить подбором параметров элементов и режимов их работы. В этом случае необходимо искать новые пути для создания высокостабильных счетных тиристорных схем. К основным из них можно отнести следующие: 1) проектирование счетных схем со структурой, исключающей возникновение помех в процессе работы; 2) проектирование счетных схем со структурой, позволяющей автоматически восстановить сбой схемы из-за возникающих в процессе работы помех.

Для установки тиристорного счетчика в исходное состояние необходимо подать соответствующие сигналы в цепи его управляющих переходов. Если схема работает в режиме сдвигающего регистра, код числа в виде коротких импульсов подается на управляющие электроды тиристорных соответствующих разрядов. Если счетчик работает в режиме кольцевого распределителя, запись единицы в первый разряд производится или от отдельного источника импульса установки, или с помощью специальной схемы установки. Последние по

принципу действия делятся на два вида: 1) схему установки анодным напряжением (рис. 14, а), 2) схему установки управляющим импульсами (рис. 14, б). В схеме на рис. 14, а при подключении напряжения питания током через диод D включается тиристор $T1$. После этого напряжение с управляющего электрода тиристора $T1$ снимается, так как он шунтируется одним из диодов $D1—D3$ через открытый тиристор. В схеме на рис. 14, б установка распределителя осуществляется самими входными импульсами. При всех запертых тиристорах пер-

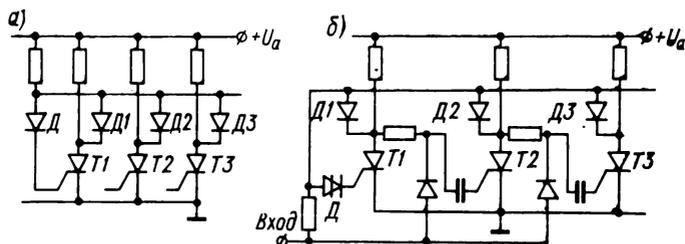


Рис. 14. Схемы для начальной установки тиристорных счетчиков источником анодного напряжения (а) и источником управляющих импульсов (б)

вый входной импульс переключает динистор D , открывая тиристор $T1$. После этого динистор D выключается, так как он шунтируется диодом $D1$. Каждый последующий входной импульс сдвигает единицу вправо. Динистор D все это время остается закрытым, так как на нем отсутствует напряжение. Достоинства схем автоматической установки проявляются в схемах с индуктивными нагрузками, так как при запираии тиристоров от помех схема самовосстанавливает информацию.

7. Счетчики импульсов с конденсаторными цепями переноса

Счетчики импульсов с конденсаторными цепями переноса являются наиболее распространенными. Благодаря конденсаторам они могут работать по принципу как включения следующего разряда, так и выключения предыдущего. Эти схемы отличаются универсальностью, так как на них можно строить кольцевые рас-

пределители, регистры сдвига параллельного и последовательного действия, накопительные счетчики. Два основных типа таких схем рассмотрены в § 6. Однако в описанном виде эти устройства практически не применяются из-за высокого уровня импульсных помех, резко снижающих надежность функционирования схем. Существует много методов уменьшения этих помех или исключения их влияния на работу схемы.

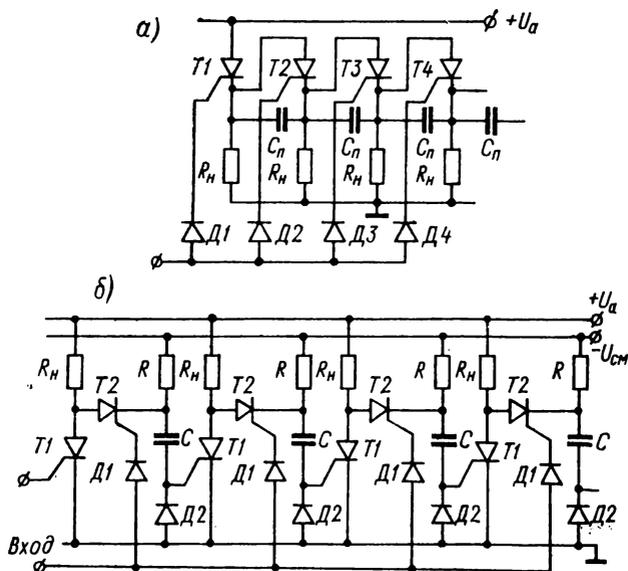


Рис. 15. Схемы счетчиков повышенной помехоустойчивости без коммутирующих конденсаторов (а) и с ключами в цепях переноса (б)

Один из возможных методов — включение интегрирующей RC -цепи в цепь переноса. Он эффективен при действии импульсных помех в цепи питания и внутренних импульсных помех от цепей коммутации. Схема, использующая этот метод, может быть построена на базе счетчика (см. рис. 13, а) разделением сопротивления переноса и подключением между средней точкой этого сопротивления и землей интегрирующего конденсатора. Для эффективного повышения помехоустойчивости по-

стоянная времени заряда и разряда этого конденсатора должна быть значительно больше постоянной времени заряда конденсатора цепи переноса, что ухудшает частотные свойства счетчика. Более эффективно введение отрицательного смещения.

Величина этого напряжения не должна превышать допустимое отрицательное смещение на управляющем электроде.

Помехоустойчивость тиристорного счетчика может быть повышена исключением цепи коммутации между разрядами или введением управляемых ключей в цепи переноса (рис. 15). Схема на рис. 15, *a* работает в режиме накопительного счетчика. Тиристоры всех разрядов включены последовательно, так что напряжение к следующему разряду подается только после включения тиристора предыдущего разряда. Такое включение позволяет практически устранить влияние dU/dt на работу схемы. Во избежание одновременного включения нескольких тиристоров от одного управляющего импульса каждый тиристор, кроме первого, зашунтирован конденсатором емкостью C_n .

Емкость этого конденсатора выбирается из условия

$$C_n \geq \frac{t_y}{R_n \ln [(U_a - U_{ост}) / (I_{выкл} R_n)]},$$

где t_y — длительность управляющего импульса.

Недостатком этой схемы является низкая экономичность, так как число включенных разрядов накапливается по мере прихода управляющих импульсов, поэтому ее следует применять в устройствах, где такой режим диктуется логикой работы. Кроме того, так как тиристоры включены последовательно, напряжение на нагрузке старших разрядов уменьшается на величину $nU_{ост}$, где n — число включенных последовательно тиристоров младших разрядов. Генератор управляющих импульсов должен иметь повышенную мощность, так как сигнал управления подключается к управляющим цепям всех тиристоров одновременно через открытые диодные ключи Д1—Д4. По мере роста числа включенных разрядов нагрузка генератора уменьшается, так как закрываются диоды открытых разрядов положительным напряжением на их катодах.

Схема на рис. 15, б содержит дополнительный тиристор в каждой цепи переноса и источник смещения $U_{см}$. В исходном состоянии все тиристоры $T2$ открываются управляющим импульсом. Конденсаторы емкостью C_1 заряжаются до положительного напряжения, запирая диоды $D1$. В тиристор $T1$ первого разряда записывается единица. При этом анод $T2$ первого разряда оказывается заземленным и он закрывается. Конденсатор C первого разряда перезаряжается до напряжения $U_{см}$ через диод $D2$ и резистор R , открывая диод $D1$ первого разряда. Входной импульс, проходя через этот диод, включает тиристоры $T2$ первого разряда и $T1$ второго разряда, сдвигая тем самым единицу вправо.

Изменение напряжения на конденсаторах C в момент включения тиристора $T1$ первого разряда имеет вид: для конденсатора первого разряда

$$U'_C = \frac{U_a R - U_{см} R_n}{R + R_n} - \frac{U_{см} + U_a}{R + R_n} R e^{-t/\tau_1}, \quad (24)$$

где $\tau_1 = RR_n C / (R + R_n)$;
для конденсатора C второго разряда

$$U''_C = -U_{см} + (U_a + U_{см}) e^{-t/\tau_2},$$

где $\tau_2 = RC$.

Величина сопротивления R выбирается из условия протекания через тиристор тока, большего, чем ток включения:

$$R \ll U_{см} / I_{вкл}.$$

Емкость конденсатора C можно найти из выражения (24) при условии, что $t = t_{выкл}$, $U'_C(t) = 0$:

$$C \geq \frac{t_{выкл} (R + R_n)}{RR_n \ln [(U_{см} + U_a) R / (U_a R - U_{см} R_n)]}.$$

Одним из путей устранения внутренних импульсных помех является исключение конденсаторов из цепей коммутации. Это можно осуществить в многотактных схемах счетчиков. Выключение тиристоров в них происходит при снятии питания с соответствующей тактовой шины. Одна из таких схем изображена на рис. 16, а.

Эта схема работает следующим образом. При подключенной к источнику питания шине 1 включается тиристор первого разряда $T1$. Напряжение на его катоде скачком поднимается до величины $U_a - U_{ост}$ и через сопротивление нагрузки второго разряда заряжается

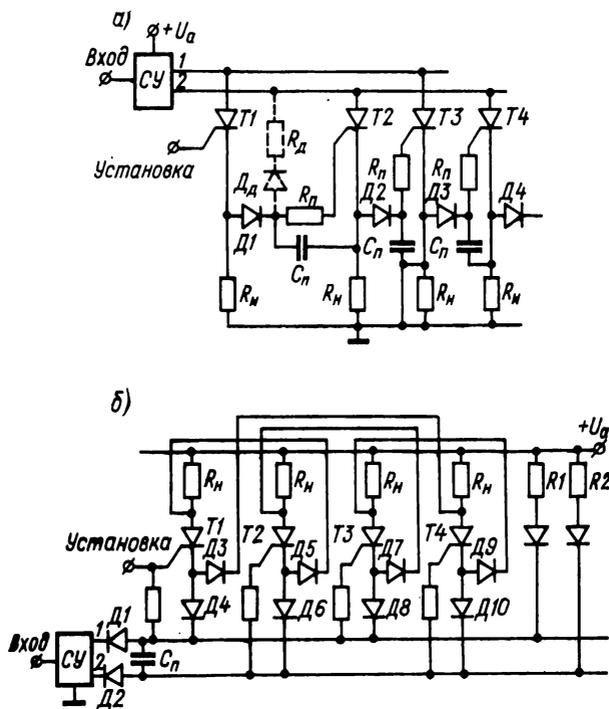


Рис. 16. Схемы двухтактных счетчиков с разделенными (а) и общим (б) конденсатором переноса

конденсатор емкостью C_n . Через управляющий электрод второго тиристора протекает ток, однако тиристор не включается, так как на его аноде отсутствует напряжение.

С приходом входного импульса схема управления $СУ$ отключает напряжение от первой шины и подключает ко второй. Тиристор первого разряда выключается, а второго — включается током разряда конденсатора емкостью C_n через его управляющую цепь. Величину

емкости конденсатора $C_{\text{п}}$, обеспечивающую включение тиристора, можно найти из выражения:

$$C_{\text{п}} = \frac{2t_{\text{вкл}}}{R_{\text{вх}} \ln [R_{\text{вх}} U_{\text{а}} / (K_{\text{з}} R_{\text{н}} I_{\text{спр}})]}, \quad (25)$$

где $R_{\text{вх}} = R_{\text{п}} + R_{\text{вн}}$, $R_{\text{вн}}$ — сопротивление управляющего перехода, $K_{\text{з}}$ — коэффициент запаса, обеспечивающий надежное включение тиристора и равный 1,3—1,5.

Величина сопротивления цепи переноса $R_{\text{п}}$ определяется из следующих соображений. Так как в установившемся режиме работы схемы через управляющие электроды всех тиристорov протекает ток статической помехи, величина которого убывает по мере удаления от включенного разряда, то наиболее опасным будет этот ток для тиристора, расположенного через один разряд от включенного. Величина его

$$I_{\text{пом. ст}} = (U_{\text{а}} - U_{\text{ост}}) R_{\text{н}} / (R_{\text{вх}} + 3R_{\text{вх}} R_{\text{н}} + R_{\text{н}}^2). \quad (26)$$

Подставляя максимальную допустимую величину помехи $I_{\text{пом. макс}}$ и значение $R_{\text{вх}}$ из уравнения (25), найдем минимальную величину $R_{\text{п}}$:

$$R_{\text{п}} \geq \frac{1}{2} \sqrt{9R_{\text{н}}^2 + 4R_{\text{н}} (U_{\text{а}} - U_{\text{ост}}) / I_{\text{пом. макс}}} - 1,5R_{\text{н}} - R_{\text{у}}. \quad (27)$$

Для предотвращения разрушения управляющего электрода тиристора соседнего с включенным разряда необходимо проверить выполнение условия

$$I_{\text{у. макс}} > I_{\text{пом. макс}} (2 + R_{\text{вх}} / R_{\text{н}}),$$

которое обеспечивает в цепи управляющего электрода соседнего со включенным тиристора ток, меньший максимального допустимого.

Для исключения тока помехи последовательно с резистором сопротивлением $R_{\text{п}}$ можно включить стабилитрон с напряжением пробоя большим, чем напряжение помехи.

Частотные свойства схемы определяются суммой времени заряда и разряда конденсатора емкостью $C_{\text{п}}$:

$$f_{\text{макс}} = 1 / (t_{\text{зар}} + t_{\text{разр}}), \quad (28)$$

где

$$t_{\text{зар}} = (3 \div 5) C_{\text{п}} R_{\text{вх}} R_{\text{н}} / (R_{\text{вх}} + R_{\text{н}}), \quad t_{\text{разр}} = (3 \div 5) C_{\text{п}} R_{\text{вх}}.$$

Так как обычно $R_{вх} \gg R_n$, для повышения частотных свойств схемы необходимо уменьшать величину $t_{разр}$. Это можно сделать, включив дополнительную цепочку D_d, R_d , которая после включения тиристора создает новую разрядную цепь. Для такой схемы

$$t_{разр} \approx (3 \div 5) C_n R_{вх} R_d / (R_{вх} + R_d).$$

Сопротивление R_d можно найти из условия максимального допустимого импульсного тока через тиристор.

Катодное включение нагрузки позволяет устранить влияние бросков питающего напряжения на помехоустойчивость схемы.

Высокостабильная схема двухтактного кольцевого распределителя приведена на рис. 16, б. В этой схеме цепь переноса сосредоточена в одном месте в виде конденсатора емкостью C_n и резисторов $R1$ и $R2$. В исходном положении шина 1 подключена к земле и конденсатор емкостью C_n через резистор $R2$ заряжен до напряжения питания. Установочный импульс включает тиристор первого разряда $T1$. Для перезаписи единицы во второй разряд на вход схемы управления подают импульс. $SУ$ отключает шину 1 от минуса источника и подключает к нему шину 2. Конденсатор емкостью C_n начинает разряжаться через управляющую цепь второго тиристора, диод $D1$, открытый тиристор первого разряда и диод $D2$. Тиристор второго разряда включается, а первого — выключается по окончании разряда конденсатора. Затем конденсатор емкостью C_n заряжается до напряжения U_a противоположного знака.

Должно выполняться условие:

$$C_n \geq \frac{2t_{вкл} (R_{вх} + R_n)}{R_{вх} R_n \ln (U_a / I_{спр})}.$$

Сопротивление резисторов R_n определяется из соображения экономичности и быстродействия схемы. С увеличением R_n уменьшаются потери в схеме, но увеличивается время переходного процесса перезаряда конденсатора емкостью C_n .

В рассмотренной схеме отсутствуют внутренние импульсные и статические помехи. Так как управляющий электрод накоротко соединен с катодом, схема имеет высокую помехоустойчивость по параметру dU/dt и защищена от самопроизвольного отпирания тириستоров.

В ряде устройств, в которых применяются тиристорные счетчики, в случае сбоя (т. е. включения внеочередного тиристора), возникшего в результате воздействия на схему помех, необходимо автоматически приводить счетчик в исходное состояние. К такому типу схем относятся кольцевые распределители для инверторов, преобразователей частоты и т. п. Рабочим состоянием кольцевого распределителя является включение только одного разряда. При ложном включении дополнительно одного или нескольких тиристоров правильная работа нарушается. Для исключения этого в схему кольцевого счетчика вводится логическое устройство, обнаруживающее сбой и восстанавливающее исходное состояние, при котором единица записана только в одном разряде. Идея работы схемы восстановления заключается в том, что замыкание распределителя в кольцо происходит через логическую схему, вырабатывающую управляющий сигнал для тиристора первого разряда в том случае, когда включен только тиристор последнего разряда.

Еще одним методом повышения надежности работы тиристорных счетчиков является структурное резервирование основных его элементов. Для схемы на рис. 13, *a* ими являются тиристоры и коммутирующие конденсаторы. Тиристорный счетчик, выполненный на базе этой схемы, снабженный элементами структурного резервирования, приведен на рис. 17 [13]. Эта схема продолжает нормально работать при пробое одного или нескольких тиристоров, не расположенных рядом, так как сдвиг распределителя на один разряд возможен лишь при наличии двух рядом расположенных открытых тиристоров, а запирающее действие предыдущего тиристора осуществляется тиристором, следующим за пробитым. Схема не теряет работоспособности при обрыве двух цепей с коммутирующими конденсаторами или пробое любого из них. Кроме того, повышается помехоустойчивость, так как наличие одного или нескольких открытых помехой тиристоров не нарушает нормального функционирования схемы. Любой n -й тиристор, открытый помехой, закрывается при сдвиге счетчика в состояние $n-3$. Для этого в каждой ячейке распределителя используются два тиристора и два коммутирующих конденсатора. Входная цепь каждого n -го тиристора соединена через диоды, образующие схему ИЛИ, с анодами $(n-1)$ и

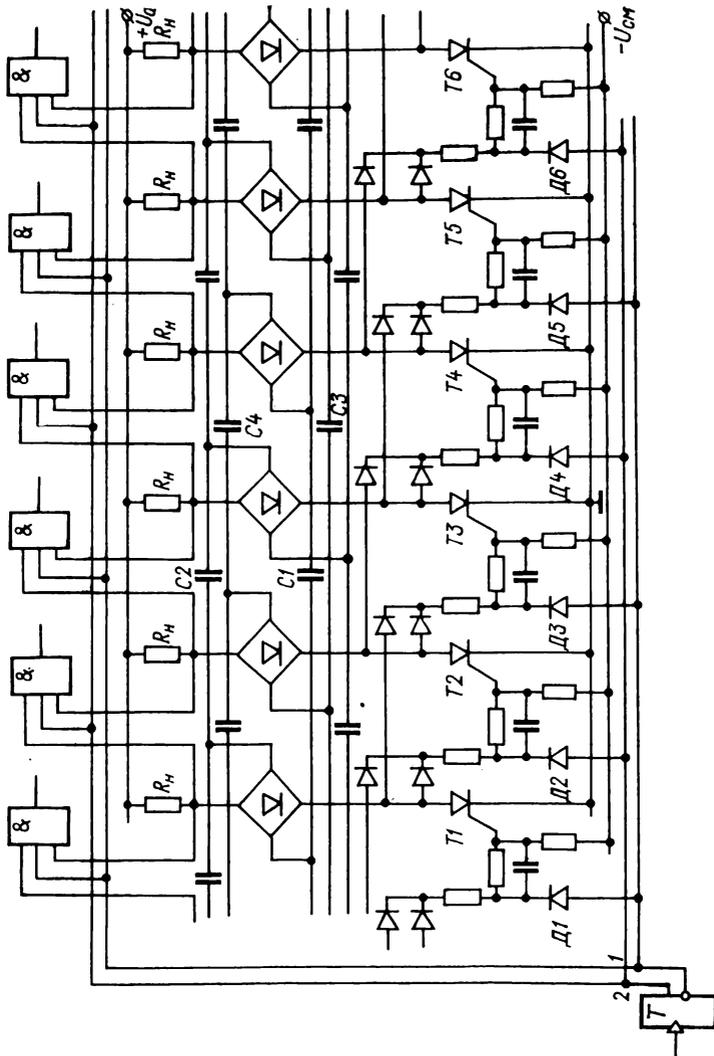


Рис. 17. Резервированная схема тиристорного счетчика

($n-2$)-го тиристора, а через входной диод — с четной или нечетной шиной управления. Анод каждого тиристора через диодный мост соединен коммутирующими конденсаторами соответственно с анодами ($n-3$) ($n-2$), ($n+2$) и ($n+3$)-го тиристора, а выход каждого из двух рядом расположенных тиристорах подключен к схемам совпадения, с которыми соединены также четная или нечетная шины управления. В каждый момент времени в разрядной ячейке распределителя включены два тиристора. Пусть, например, включены тиристоры первого и второго разрядов. Коммутирующие конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ и $C4$ заряжаются до напряжения питания соответственно через сопротивления нагрузки закрытых тиристорах $T3$, $T4$ и $T5$. Анодное напряжение закрытых тиристорах создает обратное смещение на катодах диодов $D1-D6$, закрывая их. Открыт только диод $D3$. Когда на входную шину поступает импульс, он переключает схему управления ($СУ$) и положительный импульс с шины I через открытый диод $D3$, открывает тиристор $T3$. Конденсатор $C2$ перезаряжается, закрывая тиристор $T1$. Теперь включаются тиристоры $T2$ и $T3$, подготавливая цепь для включения тиристора $T4$. При пробое или включении тиристора $T1$ оказываются включенными три тиристора подряд, но сигнал появляется на выходе только одной логической схемы $И$ в момент переключения триггера. Если этот тиристор открылся от помехи, то после включения тиристора $T4$ он закрывается, восстанавливая нормальное состояние схемы. Пробой или обрыв коммутирующего конденсатора приводит к тому, что не закрывается соответствующий тиристор, а это эквивалентно уже рассмотренному случаю.

8. Счетчики импульсов с индуктивно-трансформаторными связями

Тиристорные счетчики импульсов с индуктивно-трансформаторными связями, несмотря на существенный недостаток, заключающийся в наличии элементов с обмотками, получили широкое распространение [5, 6]. Это объясняется тем, что включение трансформаторов в цепи переноса позволяет осуществить гальваническую раз-

вязку разрядов, уменьшить или полностью исключить статические и импульсные помехи в управляющем электроде тиристора, согласовать высоковольтный выход анодных цепей тиристорov с низковольтным входом по цепи управляющего электрода. Небольшое сопротивление постоянному току обмотки импульсного трансформатора значительно повышает помехоустойчивость тиристора при больших значениях dU/dt и при самопроизвольном его включении.

В зависимости от применяемого магнитно-трансформаторного элемента в цепи переноса тиристорные счетчики с индуктивно-трансформаторными связями можно разделить на две разновидности: с трансформаторными цепями переноса и с дроссельными цепями переноса.

В схемах с трансформаторными цепями переноса для переключения тиристора следующего разряда используется энергия импульса, трансформируемого во вторичной обмотке импульсного трансформатора. В зависимости от конструкции последнего меняются информативные параметры, определяющие порядок переключения разрядных ячеек счетчика. Для импульсных трансформаторов с прямоугольной петлей гистерезиса ими может быть включенное или выключенное состояние тиристора либо напряжение на конденсаторах в цепях связи, для импульсных трансформаторов с прямоугольной петлей гистерезиса — знак индукции насыщения сердечника.

В схемах с дроссельными цепями переноса в качестве информативного параметра используется сопротивление перемагничивания дросселя или энергия, накопленная в дросселе в процессе намагничивания.

Счетчики с трансформаторными связями являются более помехоустойчивыми, чем дроссельные, так как в них управляющие импульсы поступают в первичную обмотку, гальванически отделенную от цепи управления тиристора. В дроссельных схемах источником помех служит неидеальность петли гистерезиса материала магнитопровода.

Типичная схема кольцевого распределителя с трансформаторными цепями переноса показана на рис. 18, а. В ней используются импульсные трансформаторы с прямоугольной петлей гистерезиса, а информативным параметром является состояние тиристора, к аноду ко-

торого подключен один конец первичной обмотки трансформатора. Анодное напряжение тиристора управляет состоянием диодного ключа, коммутирующего входные импульсы, поступающие в обмотку трансформатора.

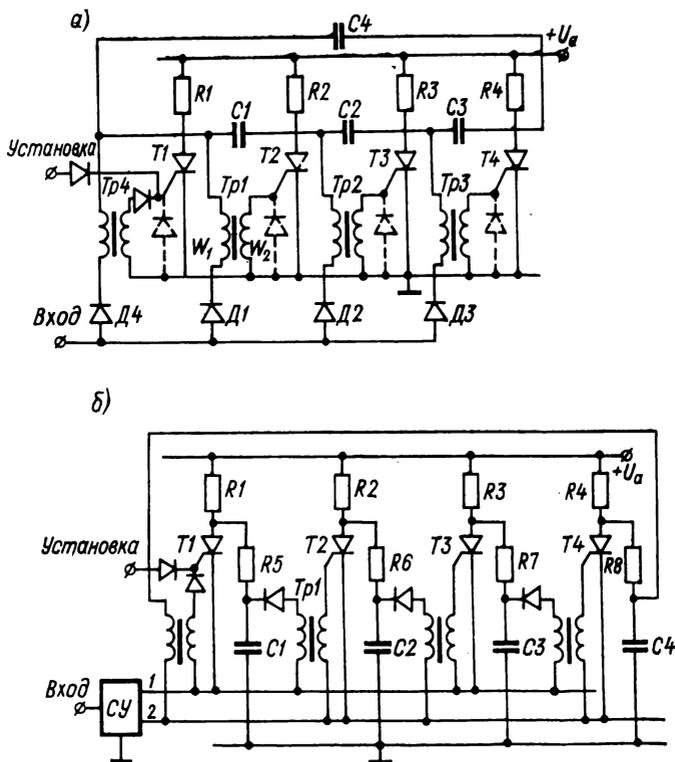


Рис. 18. Схема счетчика с трансформаторными цепями переноса: а — однотактного, б — двухтактного

При открытом тиристоре T1 на катоде диода D1 — минус источника питания и диод открыт. На катодах всех остальных диодов — плюс анодного напряжения, и они надежно заперты. С приходом управляющего импульса на общую шину протекает ток только через первичную обмотку с числом витков W_1 импульсного трансформатора $Tr1$. При этом открывается тиристор T2, а тиристор T1 запирается за счет перезаряда коммутирующего

конденсатора $C1$. Если выбрать амплитуду импульсов управления, меньшую анодного напряжения, импульсные помехи как по цепи управления, так и по анодной цепи исключатся, а шунтирование управляющего перехода низкоомной выходной обмоткой трансформаторов предохранит тиристоры от самопроизвольного включения и включения при скачкообразном изменении напряжения питания. Для предохранения изменения напряжения электрода от обратного импульсного напряжения при разряде индуктивности обмоток трансформаторов целесообразно управляющий электрод шунтировать обратновключенным диодом (показано на схеме штрихами).

Параметры импульсного трансформатора определяются исходя из того, чтобы обеспечить необходимую величину управляющего сигнала тиристора.

Размеры сердечника [2]

$$Sl \geq \frac{4U_y^2 t_{\text{вкл}} \mu_n}{\Delta B^2 R_{\text{вх}}}, \quad (29)$$

где $\Delta B = B_m - B_r$ для данного материала магнитопровода, μ_n — начальная магнитная проницаемость ферромагнетика, из которого изготовлен магнитопровод, S и l — площадь поперечного сечения и длина средней магнитной силовой линии магнитопровода.

Число витков первичной обмотки трансформатора

$$W_1 = \sqrt{\frac{L_\mu l}{\mu_\Delta S}}, \quad (30)$$

где L_μ — индуктивность намагничивания, μ_Δ — импульсная магнитная проницаемость.

Оптимальный коэффициент трансформации $n_{\text{опт}}$ при наиболее эффективной передаче тока трансформатором во вторичную обмотку за время переднего фронта импульса

$$n_{\text{опт}} = \frac{4,6 U_{\text{спр}} C_\Sigma}{I_y \tau_\Phi}, \quad (31)$$

где C_Σ — суммарная паразитная емкость, приведенная к первичной обмотке, I_y — ток управления (ток в первичной обмотке трансформатора), τ_Φ — длительность переднего фронта импульса.

Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = W_1/n_{\text{опт}} \quad (32)$$

Частотные свойства рассмотренной схемы определяются исключительно временем восстановления заряда на коммутирующем конденсаторе.

Двухтактный кольцевой распределитель с информативным параметром в виде напряжения на конденсаторах цепи переноса показан на рис. 18, б [5]. Запоминание состояния конденсаторами переноса на время коммутации позволяет использовать многотактное питание тиристоров и уменьшить время перезаряда коммутирующих элементов. Схема работает следующим образом. Пусть по входу «установка» включен первый тиристор. Тактовая шина 1 при этом подключена к минусу источника питания, а шина 2 — к плюсу. Конденсатор $C1$ разряжен через открытый тиристор $T1$, а остальные конденсаторы заряжены до напряжения питания схемы. При переключении схемы управления $СУ$ входным импульсом шина 1 подключается к плюсу источника напряжения, а шина 2 — к минусу. Конденсатор $C1$ заряжается через первичную обмотку трансформатора $Tr 1$. Передним фронтом импульса заряда включается тиристор $T2$. Тиристор $T1$ закрывается, так как на его катоде — плюс источника питания. Эта схема имеет еще более высокую помехоустойчивость, чем предыдущая, так как в установившемся режиме половина тиристоров отключена от источника питания. Большое значение dU/dt , возникающее в результате коммутации тактовых шин, не влияет на надежность работы, так как управляющие переходы тиристоров зашунтированы вторичной обмоткой трансформатора.

Тиристорный регистр сдвига, содержащий импульсные трансформаторы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), показан на рис. 19, а. Выключение тиристоров осуществляется коммутацией тактовых шин. В исходном состоянии на шине 2 — плюс источника питания, а шина 1 заземлена. Импульсом на вход «установка» сердечники всех трансформаторов переводятся в состояние с остаточной индукцией $+B_r$, кроме первого, который оказывается в состоянии $-B_r$. С приходом управляющего импульса тактовая шина 2 заземляется, а шина 1 подключается к плюсу источника пи-

тания. Через обмотку W_2 всех нечетных импульсных трансформаторов протекает ток, однако перемагничивается только $Tr 1$ из $-B_r$ в $+B_r$. Возникающий при этом импульс тока в обмотке W_3 включает тиристор

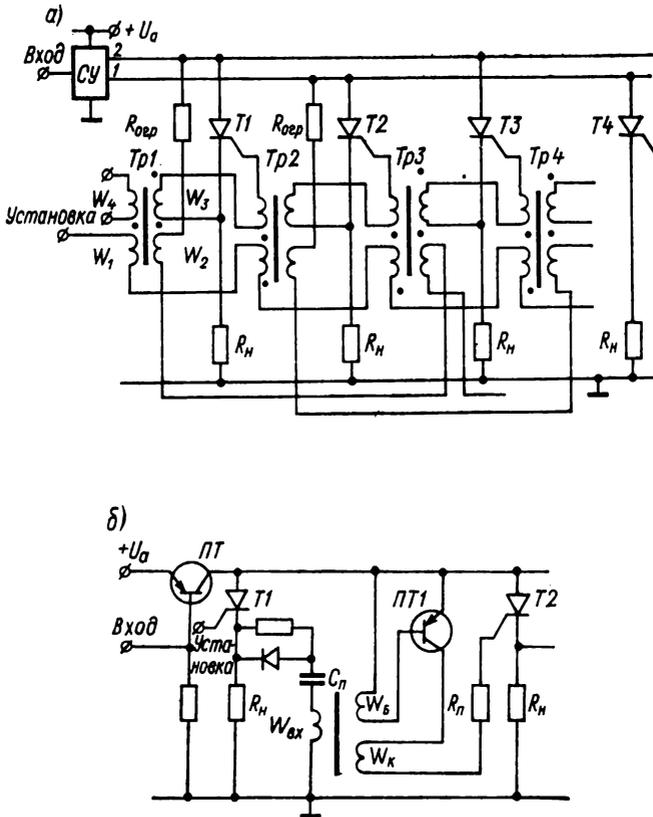


Рис. 19. Схема счетчика с цепями переноса на магнитных сердечниках с ППГ: а — трансформаторная, б — феррит-транзисторная

$T1$ и одновременно, протекая по обмотке трансформатора $Tr 2$, переводит его сердечник в состояние W_4 , подготавливая тем самым цепь переноса для записи единицы во второй разряд.

Элементы цепи переноса можно определить из следующих соображений. За время перемагничивания трансформатора в обмотке должен протекать ток, амплитуда и длительность которого достаточны для включения тиристора T_2 . Кроме того, полем, возникающим при протекании этого тока, должен перемагнититься магнитопровод второго трансформатора. Считая входной и выходной импульсы трансформатора прямоугольными, ток, протекающий через управляющий электрод, равным для надежности $K_3 I_{\text{спр}}$ (где K_3 — коэффициент запаса, $I_{\text{спр}}$ — ток спрямления), а длительность его $2t_{\text{вкл}}$, определяем параметры магнитопровода в следующем порядке.

Выбираем из стандартного ряда типоразмеров магнитопровод из материала с наибольшей остаточной индукцией B_r и наименьшей коэрцитивной силой H_c . По характеристике $1/\tau = f(H_m)$ материала магнитопровода находим значение H_m при $\tau = 2t_{\text{вкл}}$. Ток, обеспечивающий данную величину H_m , одновременно должен быть достаточным для включения тиристора. Поэтому число витков обмотки W_4 можно определить по формуле:

$$W_4 = H_m I_{\text{спр}} / (K_3 I_{\text{спр}}), \quad (33)$$

где $I_{\text{спр}}$ — средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе.

Динамическое сопротивление сердечника с числом витков W_4

$$R_d = W_4^2 \frac{2 B_r S}{l_{\text{спр}} Q_w}, \quad (34)$$

где S — площадь поперечного сечения магнитопровода, Q_w — импульс действующего поля, определяемый как

$$Q_w = S_w + 2H_0 t_{\text{вкл}}; \quad (35)$$

здесь S_w — постоянная перемагничивания магнитопровода, H_0 — пороговая, или стартовая, напряженность.

Для обеспечения тока $K_3 I_{\text{спр}}$ на выходе обмотки W_3 должно быть напряжение

$$U_{w_3} = K_3 I_{\text{спр}} (R_d \downarrow R_{\text{вн}}). \quad (36)$$

Зная величину этого напряжения, легко найти число витков обмотки W_3 :

$$W_3 = U_{w_3} t_{\text{вкл}} / (B_r S).$$

Число витков тактовых обмоток

$$W_2 = H_{\text{вх}} l_{\text{ср}} / I_m, \quad (37)$$

где $H_{\text{вх}}$ — напряженность поля, создаваемого током, протекающим по обмоткам с числом витков W_2 .

С учетом размагничивающего поля от тока выходной обмотки

$$H_{\text{вх}} = S_w / (2l_{\text{вкл}}) + H_0 + H_{\text{разм}}, \quad (38)$$

где

$$H_{\text{разм}} = K_3 I_{\text{сгр}} W_3 / l_{\text{ср}}.$$

Выразив максимальное динамическое сопротивление магнитопровода через число витков тактовой обмотки W_2 в виде

$$R_{\text{дм}} = W_2^2 \frac{2B_r S}{l_{\text{ср}} Q_w}, \quad (39)$$

максимальную величину тока тактового импульса

$$I_m = U_a / (R_{\text{дм}} + R_{\text{огр}}) \quad (40)$$

и учитывая, что сопротивление $R_{\text{огр}}$ ограничивает ток через ключи схемы управления после перемагничивания магнитопровода до величины $I_{\text{кл. макс}}$, т. е.

$$R_{\text{огр}} \geq U_a / I_{\text{кл. макс}}, \quad (41)$$

решаем совместно уравнения (37), (39) — (41).

При этом число витков обмотки W_2 можно найти следующим образом:

$$W_2 = \frac{Q_w U_a}{2 B_r S H_{\text{вх}}} + \sqrt{\left(\frac{Q_w U_a}{2 B_r S H_{\text{вх}}} \right)^2 - 4 \frac{Q_w U_a}{2 B_r S}}. \quad (42)$$

Аналогично можно определить W_1 , однако целесообразно выбрать $W_1 = W_2$.

В качестве элементов связи между разрядами могут быть использованы феррит-транзисторные ячейки. Одна из таких схем показана на рис. 19, б [4]. При включении тиристора $T1$ происходит заряд конденсатора емкостью C_n через обмотку $W_{\text{вх}}$ импульсного трансформатора с ППГ. Ток заряда этого конденсатора не передается в следующий разряд, так как в базовой обмотке W_6 создается напряжение, запирающее транзистор $ПТ1$. С приходом положительного входного импульса закры-

вается транзистор $ПТ$ и тиристор $T1$ выключается. Начинается разряд конденсатора емкостью C_p через сопротивление нагрузки и $W_{вх}$ трансформатора. На базовой обмотке транзистора $ПТ1$ создается отпирающее напряжение, и при восстановлении питания начинается регенеративный процесс открывания транзистора $ПТ1$, коллекторный ток которого включает тиристор $T2$. Далее процесс повторяется, сдвигая число на один разряд с приходом каждого входного импульса. Порядок расчета феррит-транзисторной ячейки рассмотрен в [2]. При расчете необходимо учитывать, что время перемагничивания магнитопровода, как и в предыдущей схеме, должно быть достаточным для включения тиристора.

Величину сопротивления цепи переноса $R_{п}$ можно найти из условия протекания через управляющий переход тиристора тока, равного $K_3 I_{спр}$:

$$R_{п} = 0,5U_a / I_{спр} - R_{вн} - R_{н}.$$

Считая, что число витков коллекторной обмотки W_k примерно равно числу витков входной обмотки, можно записать условие выделения максимальной мощности в нагрузке ячейки [2]:

$$R_{п} + R_{вн} + R_{н} = 2R_{\phi} W_{вх}^2,$$

где R_{ϕ} — характеристическое сопротивление ферритового магнитопровода.

Отсюда

$$W_{вх} = W_k = \sqrt{(R_{п} + R_{вн} + R_{н}) / (2R_{\phi})}. \quad (42)$$

Характеристическое сопротивление магнитопровода

$$R_{\phi} = \frac{B_r S}{(0,5S_{\omega} / t_{вкл} + H_0) l_{ср} t_{вкл}}, \quad (43)$$

где $B_r S$, $l_{ср}$, S_{ω} определяются из справочника для выбранного магнитопровода.

Число витков базовой обмотки

$$W_0 = \frac{4 I_{спр} R_{вх. тр} t_{вкл}}{\beta (B_r + B_m) S}, \quad (44)$$

где $R_{вх. тр}$ — входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, β — коэффициент усиления транзистора.

Максимальное быстродействие схемы определяется временем подготовки цепи входной обмотки, равным

времени заряда и разряда конденсатора в цепи переноса C_n ,

$$t_{\text{подг}} = t_{\text{зар}} + t_{\text{разр}}.$$

Время заряда $t_{\text{зар}} = (3 \div 5) \tau_{\text{зар}}$, где $\tau_{\text{зар}} = C_n (R_{\text{огр}} + R_d)$, а время разряда $t_{\text{разр}} = C_n (R_n + R_d)$.

Помехоустойчивость схемы определяется помехоустойчивостью феррит-транзисторной ячейки и может быть повышена обычными методами [2].

Две схемы с дроссельными цепями переноса показаны на рис. 20. Схема на рис. 20, а имеет общую шину входа, соединенную со вторичными обмотками дросселей с подмагничиванием $Dp1-Dp3$, выполненных на ферромагнетике с прямоугольной петлей гистерезиса. Второй конец этих обмоток подключен к управляющим электродам тиристоров. При включении питания магнитопроводы всех трансформаторов устанавливаются в состояние насыщения ($+B_s$) током через первичные обмотки дросселей и через сопротивления R_y . Для входных импульсов сопротивление дросселей велико, так как $H_{\text{см}} \gg H_y$, где $H_{\text{см}}$ и H_y — напряженность полей, создаваемых током смещения через R_y и током управления соответственно.

Ток, протекающий в управляющей цепи тиристоров от входных импульсов, меньше допустимого тока помехи, и тиристоры заперты. При включении $T1$ ко входу «установка» ток смещения в $Dp1$ падает до нуля и сердечник переходит в состояние $+B_r$. Теперь входной импульс перемагничивает сердечник дросселя, его сопротивление падает до активного сопротивления обмотки дросселя, и при достаточной длительности управляющего сигнала тиристор $T2$ включается. На длительность входных импульсов управления накладывается ограничение:

$$t_y \geq \tau_n + 2t_{\text{вкл}},$$

где τ_n — время перемагничивания магнитопровода.

Для защиты управляющих электродов тиристоров от действия обратного напряжения при перемагничивании сердечников трансформаторов по первичной обмотке целесообразно шунтировать тиристоры обратновключенными диодами.

В схеме на рис. 20, б используются дроссели с прямоугольной петлей гистерезиса без подмагничивания. Включение тиристорov осуществляется энергией, накопленной в дросселе. Пусть, например, включен тиристор $T1$. Диод $D1$ при этом открыт, и через дроссель $Dp1$ протекает ток

$$I_{др} = U_{ст}/R_y,$$

где $U_{ст}$ — напряжение на стабилитроне.

Потенциал катодов остальных диодов подбирается с помощью делителя R_n , R_y так, чтобы на них был положительный потенциал, и тогда диоды надежно заперты. При поступлении входного импульса триод $ПТ$ закрывается. Тиристор $T1$ выключается. Накопленная в дросселе $Dp1$ энергия разряжается через параллельно включенные управляющий переход тиристора $T2$ и сопротивление R_y . При восстановлении питания схемы включается тиристор $T2$, так как через его управляющую цепь протекает ток разряда дросселя $Dp1$. Диод $D2$ открывается, подготавливая цепь переноса для третьего разряда.

Переходный процесс разряда индуктивности дросселя описывается уравнением:

$$I(t) = I(0) e^{-t/\tau_{разр}}, \quad (45)$$

где

$$\tau_{разр} = L_{др} (R_{вн} + R_y)/(R_{вн} R_y), \quad (46)$$

$$I(0) = I_{др} = U_{ст}/R_y. \quad (47)$$

Подставляя в уравнение (45) $I(t) = K_3 I_{спр}$ (где K_3 — коэффициент запаса), $t = t_{выкл} + 2t_{вкл}$ и решая его совместно с уравнениями (46) и (47), получим минимальную величину индуктивности дросселя

$$L_{др} = \frac{R_{вн} R_y (t_{выкл} + 2t_{вкл})}{(R_{вн} + R_y) \ln [U_{ст}/(K_3 I_{спр} R_y)]}. \quad (48)$$

Величину сопротивления R_y можно найти из условия положительного смещения на катоде диодов

$$U_d = U_a R_y / (R_n + R_n + R_y) \geq U_{ст}, \quad (49)$$

откуда

$$R_y \geq [U_{ст} (R_n + R_n)] / (U_a - U_{ст}). \quad (50)$$

В рассмотренной схеме при запертых тиристорах в нагрузку протекает ток делителя $R_{\text{п}}, R_{\text{у}}$, уменьшая потенциал логического нуля схемы U_0 . В относительных

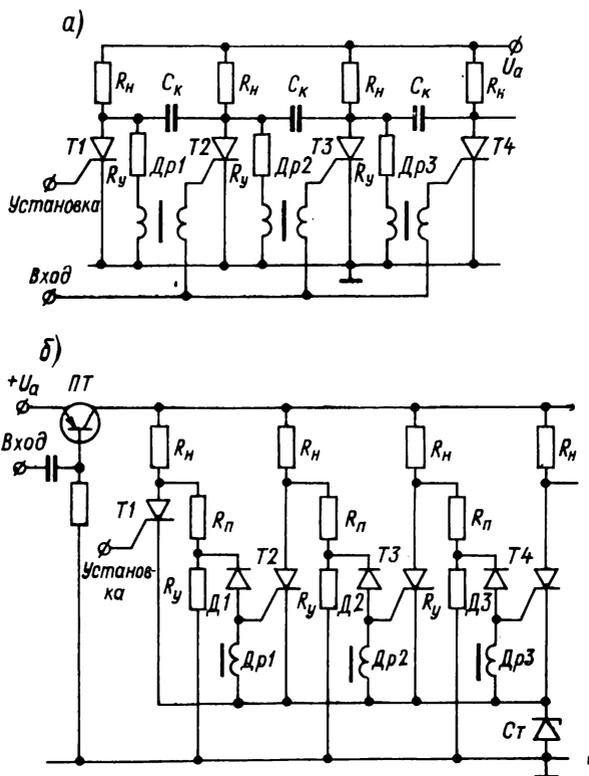


Рис. 20. Схема счетчика с дроссельными цепями переноса: а — с непрямоугольной, б — с прямоугольной петлей гистерезиса

единицах это изменение потенциала можно характеризовать коэффициентом

$$K_0 = U_0/U_a = (R_{\text{п}} + R_{\text{у}})/(R_{\text{н}} + R_{\text{п}} + R_{\text{у}}). \quad (51)$$

При открытом тиристоре потенциал на выходе схемы отличается от нулевого на величину напряжения стабилизации стабилитрона, создавая на выходе потенциал

логической единицы U_1 , характеризуемый коэффициентом

$$K_1 = U_1/U_a = U_{ст}/U_a. \quad (52)$$

Определяем значения R_n из уравнения (51) и $U_{ст}$ из (52), подставляем их в выражение (50) для случая равенства правой и левой части:

$$R_n = \frac{K_0 R_n + R_y (K_0 - 1)}{1 - K_0} = \frac{K_0 R_n}{1 - K_0} - R_y, \quad (53)$$

$$R_y = \frac{K_1 R_n}{1 - K_0}. \quad (54)$$

Теперь индуктивность дросселя легко найти из уравнения (48) с учетом выражений (52) и (53):

$$L_{др} = \frac{K_1 (t_{выкл} - 2t_{вкл}) R_n R_{вн}}{[R_{вн} (1 - K_0) + K_1 (R_n - 2R_{вн})] \ln [U_a (1 - K_0) / (K_3 I_{спр} R_n)]}. \quad (55)$$

Анализируя это выражение, можно заметить, что $L_{др}$ стремится к бесконечности при $\ln [U_a (1 - K_0) / (K_3 I_{спр} R_n)]$, стремящемся к единице. Поэтому в граничном случае после несложных преобразований получаем

$$K_0 = 1 - K_3 I_{спр} / I_n,$$

т. е. потенциал логического нуля схемы зависит от отношения $I_{спр}/I_n$. При $I_n = I_{н. макс}$ это отношение для различных тиристоров имеет разную величину. Для тиристоров КУ101 оно равно 15, для КУ201 — 20, для КУ202 — 100.

Быстродействие схемы, как и предыдущей, определяется суммой времени заряда и разряда дросселей $Dp1-Dp3$:

$$t_{зар} = (3 \div 5) \tau_{зар},$$

где $\tau_{зар} = L_{др} R_y$,

$$t_{разр} = (3 \div 5) \tau_{разр},$$

где $\tau_{разр}$ определяется уравнением (47).

9. Счетчики импульсов с резистивными и непосредственными связями

Общими недостатками тиристорных счетчиков с реактивными элементами в цепях переноса и коммутации являются неполное использование частотных свойств тиристоров, большие габариты и низкая технологичность коммутирующих элементов. От этих недостатков свободны схемы с безреактивными связями — резистивными и непосредственными. Коммутация тиристоров в них осуществляется с помощью полупроводниковых ключей, соединяющих тиристоры с соответствующей шиной питания. Так как информация в разрядной ячейке может запоминаться лишь тиристором, в этом типе счетчиков для сдвига информации используется только метод включения следующего разряда. А так как время коммутации тиристоров мало и практически не оказывает влияния на задержку сигнала при сдвиге, необходимо вводить искусственную задержку, исключающую включение от одного импульса нескольких рядом стоящих тиристоров. Такая задержка хорошо осуществляется при многотактной коммутации питающего тиристоры напряжения. Поэтому все тиристорные счетчики с резистивными и непосредственными связями являются многотактными. Информация от разряда к разряду переносится коммутацией части анодного тока открытого тиристора в управляющую цепь закрытого тиристора следующего разряда.

По виду коммутируемых шин безреактивные схемы тиристорных счетчиков можно разделить на схемы: 1) с катодной коммутацией, в которых поочередно подключаются к минусу источника питания катодные тактовые шины, а общей является положительная шина питания, 2) с анодной коммутацией, в которых поочередно подключаются к плюсу источника питания анодные тактовые шины, а общей является отрицательная шина, 3) с комбинированной коммутацией, в которых коммутируются и катодные и анодные шины.

Цепи переноса между разрядами подключаются к анодной или катодной цепи тиристора предыдущего разряда и к управляющим электродам тиристора следующего разряда и могут быть: 1) резистивными (в цепь

переноса включен только резистор, 2) непосредственными (цепь переноса замкнута накоротко), 3) ключевыми (в цепь переноса включен диодный или транзисторный ключ).

В счетчиках с катодными нагрузками после включения следующего разряда цепь переноса запирается высоким потенциалом, появляющимся на катоде тиристора. Тем самым исключается паразитная цепь для протекания анодного тока тиристора предыдущего разряда. При анодном включении нагрузки ключи в цепи переноса могут отсутствовать и в схеме появляются паразитные цепи, препятствующие запирающему соответствующих тиристорам. Поэтому после включения следующего разряда необходимо обеспечить выключение тиристора предыдущего разряда дополнительными мерами.

Для этого применяется три метода: 1) использование преобладания ток авыключения $I_{\text{выкл}}$ тиристора над током спрямления $I_{\text{спр}}$ и времени выключения $t_{\text{выкл}}$ над временем включения $t_{\text{вкл}}$ (см. § 1, 2) применение комбинированной коммутации, 3) использование транзисторных ключей в цепях переноса.

Достоинством безреактивных схем счетчиков является не только высокое быстродействие, которое ограничивается лишь частотными свойствами тиристорам, но и отсутствие внутренних помех. Однако при работе схемы необходимо учитывать статические помехи, возникающие из-за неидеальности характеристики ключевых приборов в цепях коммутации, и высокую скорость нарастания анодного напряжения, объясняющуюся коммутацией тактовых шин с помощью полупроводниковых приборов. Поэтому необходимо принимать меры для исключения ложного отпирания тиристорам.

Рассмотрим основные разновидности схем этого класса. Для изолированных нагрузок, не имеющих общей точки, наиболее подходят двухтактные кольцевые схемы счетчиков с ключевыми цепями переноса [15]. Они могут работать и как сдвигающие регистры, в режиме «косого» сдвига. В случае когда необходимо включать сопротивления нагрузки в общую точку, используются схемы с катодной нагрузкой и анодными цепями коммутации или схемы с анодной нагрузкой (рис. 21). Эти схемы трехтактные и поэтому применяются преимущественно в режиме кольцевого распределителя. Счет-

чик со схемой, приведенной на рис. 21, а, работает следующим образом. Если проводит тиристор первого разряда, то на шине 1 — плюс анодного напряжения, а шины 2 и 3 заземлены. Для сдвига единицы подклю-

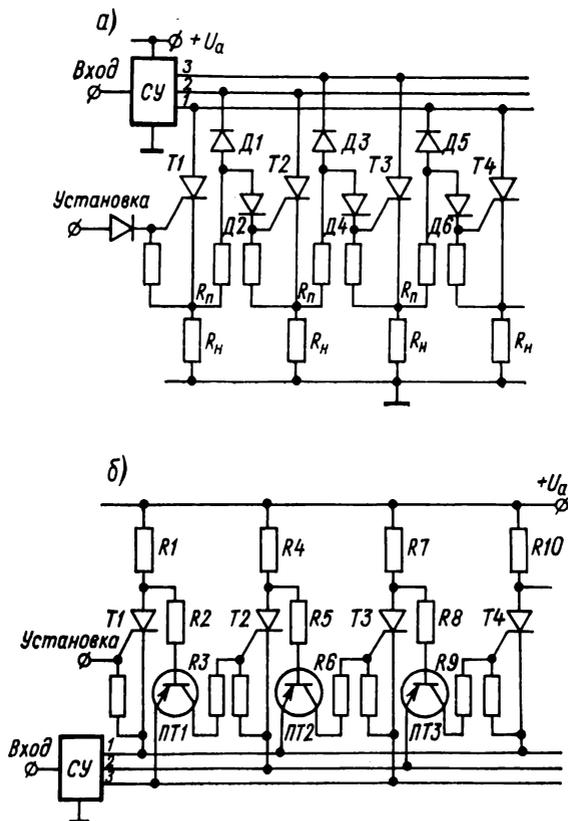


Рис. 21. Схема трехтактного счетчика: а — с анодной, б — с катодной коммутацией тактовых шин

чается плюс питания на шину 2. Диод D_1 запирается, и управляющий сигнал включает тиристор T_2 . Шина 1 заземляется, и тиристор T_1 выключается. Включение нагрузки с общей точкой позволяет исключить диоды в цепи нагрузки.

Расчетные соотношения для параметров схем аналогичны рассмотренным. Порядок переключения тактовых шин ясен из табл. 1, в которой столбцы с номерами соответствуют установившимся потенциалам тактовых шин для каждого разряда, а столбцы без номеров определяют порядок подключения потенциалов к тактовым шинам во время коммутации.

Таблица 1

Шина	Разряд											
	1		2		3		4		5		6	
1	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+
2	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
3	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+

Примечание. Знак плюс означает, что шина подключена к плюсу источника питания, а знак минус—что шина заземлена.

Для надежного включения тиристора следующего разряда ток в его управляющей цепи должен быть больше тока спрямления и должно удовлетворяться условие:

$$\frac{U_a - \Sigma U_{\text{ост}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{п}} + R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}(R_{\text{н}} + R_{\text{п}})/R_{\text{ш}}} \geq I_{\text{спр}}, \quad (56)$$

где $\Sigma U_{\text{ост}}$ — падение напряжения на открытом тиристоре, диоде Д2 и ключе схемы управления, $R_{\text{ш}}$ — сопротивление, шунтирующее входную цепь тиристора.

Отсюда необходимую величину $R_{\text{п}}$ можно определить, приравняв левую часть правой:

$$R_{\text{п}} = \frac{R_{\text{ш}}(U_a - \Sigma U_{\text{ост}})}{K_{\text{э}} I_{\text{спр}}(R_{\text{ш}} + R_{\text{вн}})} - \frac{R_{\text{н}} R_{\text{вн}} + R_{\text{н}} R_{\text{ш}} + R_{\text{вн}} R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{вн}}}. \quad (57)$$

Минимальная величина сопротивления $R_{\text{п}}$ определяется исходя из экономичности схемы, так как $R_{\text{п}}$ шунтируется сопротивлением нагрузки. Пренебрегая па-

дением напряжения $U_{\text{ост}}$ и коммутационными потерями, к. п. д. схемы η можно выразить соотношением:

$$\eta = R_{\text{н}}/R_{\text{п}}. \quad (58)$$

Тогда минимальное напряжение питания, при котором работоспособна схема, можно найти из неравенства (51) при $R_{\text{ш}} = \infty$, подставив значение тока $K_3 I_{\text{спр}}$ и $R_{\text{п}}$ из уравнения (58):

$$U_{\text{а. мин}} = U_{\text{ост}} + K_3 I_{\text{спр}} [R_{\text{вн}} + R_{\text{н}} (1 + 1/\eta)]. \quad (59)$$

В момент коммутации при одновременном подключении к земле двух тактовых шин ко входной цепи тиристора прикладывается напряжение помехи, равное падению напряжения на открытом диоде. Ток, протекающий через управляющий электрод тиристора, очень мал, так как он ограничивается сопротивлением диода $D2$, имеющим большую величину при таком напряжении. Однако, действуя одновременно с током, возникающим в структуре тиристора из-за большой скорости нарастания анодного напряжения dU/dt , он может служить причиной ложного включения тиристора в момент, когда все тиристоры находятся под напряжением. Тогда происходит цепной процесс включения всех тиристоров и схема теряет управляемость. Для исключения этого схему управления надо строить таким образом, чтобы время переключения тактовых шин было меньше времени включения тиристора или чтобы положение, при котором обе шины заземлены, было исключено.

В схеме на рис. 21, б общая точка нагрузок подключена к плюсу питания. Управление тиристорами осуществляется от тактовых шин через транзисторы $ПТ$, состояние которых зависит от потенциала на анодах тиристоров. В исходном состоянии все тиристоры, кроме первого, закрыты, шина 1 заземлена, а на шинах 2 и 3 — плюс источника питания. Транзисторный ключ $ПТ1$ открыт током через резистор $R2$, а остальные ключи заперты положительным потенциалом на базе. При поступлении входного импульса шина 2 заземляется и тиристор $T2$ открывается током через $ПТ1$, затем шина 1 подключается к плюсу источника питания, закрывая тиристор $T1$. Базовые сопротивления R_2, R_5, R_8 выбираются из условия насыщенного состояния транзисторного ключа при токе $K_3 I_{\text{спр}}$. Помехи при коммутации

в этой схеме отсутствуют. Порядок переключения тактовых шин показан в табл. 2.

Таблица 2

Шина	Разряд											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+
3	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-

Другим способом управления тиристорами в счетчиках с анодной нагрузкой является применение смешанной коммутации тактовых шин (рис. 22, а). Схема работает следующим образом. Пусть в исходном положении на шине 1 — плюс источника питания, а на шинах 2 и 3 — минус. Тиристор 1 включается импульсом, подаваемым на вход «установка». Для сдвига информации шина 2 соединяется с плюсом источника питания. Диод $D1$ запирается, и весь анодный ток тиристора $T1$ протекает через управляющую цепь тиристора $T2$, включая его. После этого шина заземляется. Порядок переключения тактовых шин соответствует табл. 1.

Схемы с анодной нагрузкой, использующие для выключения принцип недостаточности анодного тока [15], требуют подбора тиристорov по току выключения и току спрямления, поэтому применяются редко.

Для повышения экономичности устройств, в которых информация считывается относительно редко, целесообразно использовать счетчики по схеме на рис. 22, б. В процессе работы нагрузки отключены, а информация передается по высокоомным цепям, обеспечивающим сохранение тиристорами включенного состояния. Пусть, например, схема работает в режиме счета. При этом шина 1 отключена от источника питания (или соединена с его плюсом), шина 2 подключена к плюсу, а шина 3 и 4 — к минусу источника. Импульсом на входе «установка» включается первый тиристор. Транзисторный ключ $ПТ1$

отперт, и включенное состояние тиристора $T1$ поддерживается током через резистор $R1$. Для переноса информации в следующий разряд к шине 3 подключается плюс источника. Диод $D1$ запирается, и весь ток тиристора $T1$ протекает через управляющую цепь тиристора

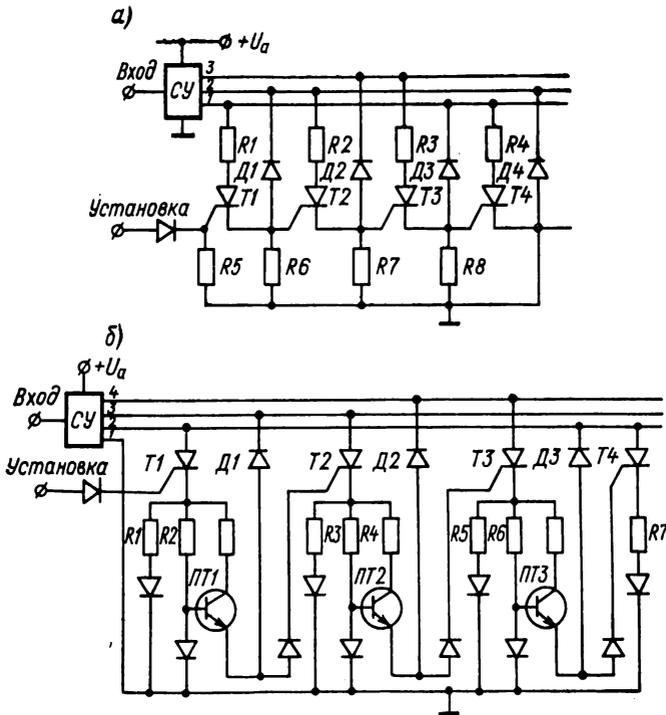


Рис. 22. Схема трехтактного счетчика с комбинированной коммутацией тактовых шин: а — с диодными ключами, б — с транзисторными

$T2$ и транзистор $ПТ2$. Тиристор $T2$ включается, а $T1$ выключается после отключения шины 2 от плюса источника питания. В режиме считывания к шине 1 подключается минус источника и через сопротивление нагрузки, которое стоит в катодной цепи открытого тиристора, протекает ток. Переключение тактовых шин 2, 3 и 4 происходит в соответствии с табл. 1.

Для повышения надежности работы счетчиков с резистивными и непосредственными связями, кроме обычных методов, применяемых для изолированных тиристорных ключей, используются схемные методы (рис. 23). Защита, применяемая в схеме на рис. 23, а, заключается

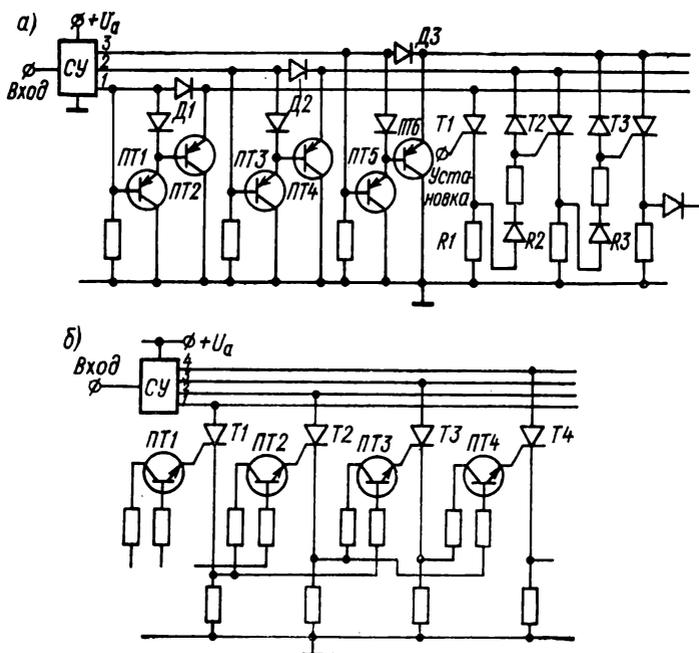


Рис. 23. Схема счетчика повышенной помехоустойчивости с резистивными связями: а — с отсечкой по цепи питания, б — с логической защитой

в том, что тиристорный счетчик в режиме ожидания защищается от помех по тактовым шинам. Действительно, если тактовые шины не подключены к плюсу питания, тиристоры *ТТ* открыты и шунтируют любую помеху, возникающую в тактовых шинах. При подаче плюса на любую тактовую шину (например, 1) со стороны схемы управления транзистор *ТТ1* запирается, что приводит к запираанию *ТТ2* и подключению плюса ко всем тиристорам, соединенным с этой шиной. Диоды служат для разделения цепей питания транзисторов, подключенных

к одной шине, предотвращая их запираание от сигнала помехи. В схеме на рис. 23, б цепь переноса проводит только при наличии двух открытых, рядом стоящих тиристоров. Поэтому при самопроизвольном включении какого-либо одного тиристора информация передаваться дальше не будет и через такт состояние схемы восстановится.

10. Динамические счетчики импульсов

Динамические счетчики импульсов могут работать в цепях постоянного и переменного тока. В первом случае в цепи переноса между разрядными ячейками включаются емкостные или индуктивные элементы задержки, параметры которых определяют частоту переключений. Во втором случае эта частота повторяет частоту напряжения сети.

Динамические схемы целесообразно применять в режиме многофазных мультивибраторов, когда отсутствует схема управления и устройство в целом упрощается, и в режиме сдвиговых регистров и кольцевых распределителей с питанием от промышленной сети переменного тока. В этом случае отпадает необходимость в источнике постоянного напряжения.

Методы построения динамических схем мало отличаются от выше рассмотренных.

Схема с емкостными цепями коммутации и переноса показана на рис. 24, а. При включении тиристора $T1$ начинает заряжаться конденсатор C_n , однако тиристор $T2$ не включается, так как в цепи его управляющего электрода включен стабилитрон $D1$. Когда напряжение на конденсаторе достигнет величины напряжения пробоя стабилитрона, ток в управляющей цепи $T2$ увеличивается и последний открывается. Тиристор $T1$ закрывается перезарядом коммутирующего конденсатора C_k .

Величина времени задержки включения следующего тиристора определяется параметрами зарядной цепи конденсатора C_n и равна

$$t_3 = t_1 + t_2, \quad (60)$$

где t_1 — время нарастания напряжения на конденсаторе C_n до величины напряжения пробоя стабилитрона U_{CT} ,

$$t_1 = \tau_1 \ln [(U_a - U_{\text{ост}})/(U_a - U_{\text{ост}} - U_{\text{ст}})], \quad (61)$$

$$\tau_1 = R_{\text{п}} C_{\text{п}}, \quad (62)$$

а t_2 — время нарастания напряжения на конденсаторе $C_{\text{п}}$ до величины, обеспечивающей в управляющей цепи ток $I_{\text{спр}}$,

$$t_2 = \tau_2 \ln \{(U_a - U_{\text{ост}} - U_{\text{ст}})/[U_a - U_{\text{ост}} - \\ - 2U_{\text{ст}} - I_{\text{спр}}(R_{\text{вн}} + R_{\text{н}})]\}, \quad (63)$$

$$\tau_2 = C_{\text{п}} \frac{R_{\text{п}}(R_{\text{вн}} + R_{\text{н}})}{R_{\text{п}} + R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}. \quad (64)$$

При заданной длительности импульса t_3 на каждом плече мультивибратора легко определить из уравнений (60) — (64) параметры элементов цепей переноса.

Многофазный мультивибратор по схеме на рис. 24, б отличается тем, что выключение тиристоров осуществляется в нем ключами на транзисторах $ПТ$, включенными последовательно с тиристорами. В исходном состоянии все три транзистора открыты. При запуске схемы импульсом на входе «установка» включается тиристор $T1$. По истечении времени t_3 включается тиристор $T2$. Потенциал на его катоде возрастает до напряжения питания и через резистор $R3$ передается на базу транзистора $ПТ1$, запирая его. Тиристор $T1$ выключается. Эта схема менее критична к параметрам коммутирующих элементов и проще в настройке.

Многофазные мультивибраторы можно строить на тиристорах, управляемых сигналами разной полярности (рис. 25). Схема работает следующим образом. Тиристор $T4$ включается отрицательным импульсом на входе «запуск». Начинается заряд конденсатора $C1$ через дроссель $Др$ и открытый тиристор $T1$. Параметры C и L подбираются таким образом, чтобы процесс был колебательным. Через полпериода тиристор $T4$ закрывается, так как к нему прикладывается отрицательное напряжение. Конденсатор $C1$ начинает разряжаться через источник питания, дроссель $Др$, диод $Д2$ и управляющие переходы тиристоров $T1$ и $T5$, включая послед-

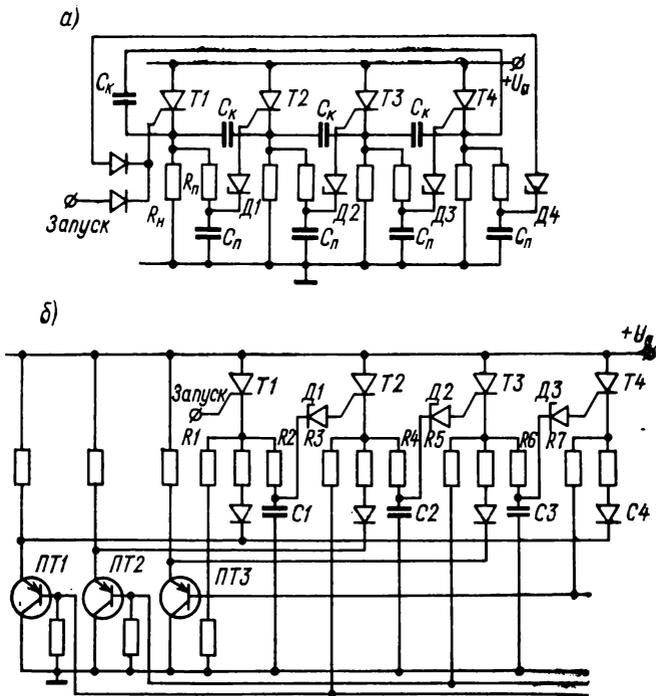


Рис. 24. Схема многофазного мультивибратора: а — с емкостной коммутацией, б — с коммутацией полупроводниковыми ключами

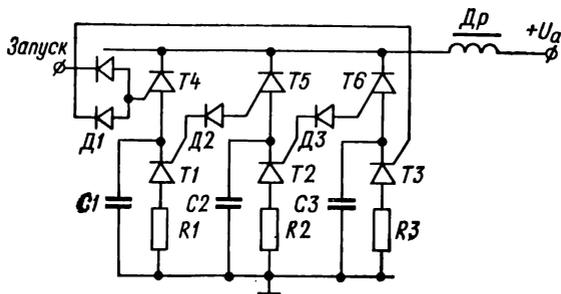


Рис. 25. Схема многофазного мультивибратора на тиристорах, управляемых сигналами разной полярности

ние. При этом тиристор $T1$ закроется после разряда конденсатора $C1$, а $T2$ — после изменения на нем знака напряжения.

Время задержки импульса в каждом разряде определяется временем заряда конденсатора, а также временем включения и выключения тиристоров. Учитывая, что длительность $t_{\text{вкл}}$ и $t_{\text{выкл}}$ обычно мала по сравнению с временем задержки t_3 , последнее можно ориентировочно определить из соотношения:

$$t_3 = \sqrt{LC}.$$

В качестве элементов задержки можно использовать дроссели насыщения (рис. 26). В исходном состоянии в этой схеме сердечники всех дросселей находятся в состоянии — B_r под действием тока от источника смещения. При запуске схемы включается тиристор $T1$. По обмотке W_1 дросселя $Dp1$ протекает ток, создающий поле, напряженность которого превышает напряженность поля смещения. Однако тиристор $T2$ не включается, так как динамическое сопротивление сердечника велико и практически все напряжение питания прикладывается к обмотке. По окончании процесса перемагничивания сопротивление обмотки падает, ток увеличивается и тиристор $T2$ включается. После выключения тиристора $T1$ коммутирующим конденсатором сердечник дросселя $Dp1$ возвращается в состояние — B_r под действием тока смещения.

Время задержки в этой схеме определяется временем перемагничивания сердечника под действием разностного поля:

$$t_3 = \frac{S_w}{H_m - H_0},$$

где $H_m = H_n - H_{\text{см}}$, H_n и $H_{\text{см}}$ — напряженности полей, возникающие при протекании токов переноса и смещения по обмоткам W_1 и W_2 соответственно, H_0 — напряженность трогания.

Две схемы распределителей с питанием от сети переменного напряжения показаны на рис. 27. В схеме рис. 27, а в качестве информативного параметра используется заряд, накопленный на конденсаторе. Принцип работы схемы заключается в следующем. Пусть положи-

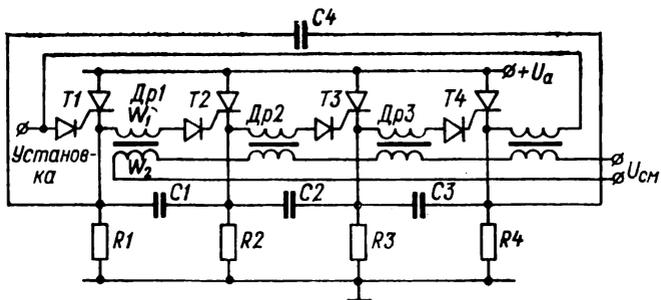


Рис. 26. Многофазный мультивибратор с индуктивной линией задержки

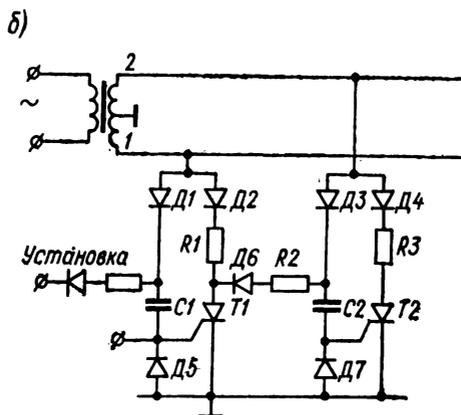
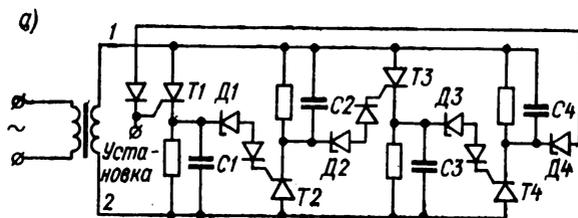


Рис. 27. Схемы динамического счетчика с питанием от сети переменного напряжения

тельный полупериод напряжения подан на шину 1 и включен тиристор $T1$. Конденсатор $C1$ заряжается до амплитудного напряжения $U_{a. макс.}$. Остальные конденсаторы разряжены, так как напряжение пробоя стабилитрона выбирается большим, чем $U_{a. макс.}$. При изменении полярности напряжения к управляющей цепи тиристора $T2$ прикладывается удвоенное амплитудное напряжение. Стабилитрон $Д1$ пробивается, и включается тиристор $T2$.

В схеме на рис. 27, б [14] информативным является разряженное состояние конденсатора. Действительно, в исходном состоянии конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжены до амплитудного напряжения. При включении тиристора $T1$ конденсатор $C2$ разряжается. В следующий полупериод питающего напряжения $C2$ зарядится током через управляющий электрод тиристора $T2$, включая последний.

Большим достоинством схем на переменном токе является естественная коммутация тиристоров, которая позволяет исключить цепи коммутации и существенно упростить схему.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ НА ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ $p-n-p-n$ -СТРУКТУРАХ

11. Счетчики импульсов на запираемых тиристорах

Принципы построения счетных схем на запираемых тиристорах мало чем отличаются от принципов построения аналогичных схем на триодных тиристорах. Тем не менее более широкие функциональные возможности запираемых тиристоров открывают дополнительные резервы для повышения качества и экономичности тиристорных схем. Использование этих резервов заключается в упрощении схем коммутирующих цепей, уменьшении затрат мощности на выключение тиристоров, уменьшении времени восстановления коммутирующих элемен-

тов. Все эти преимущества проявляются только в цепях постоянного тока, где применяется принудительная коммутация тиристоров. Так как включение запираемых тиристоров осуществляется теми же методами, что и обычных тиристоров, схемы цепей переноса в счетчиках одинаковы. Поэтому в основу счетных схем на запираемых тиристорах положены основные схемы, описанные в предыдущей главе.

Однотактная схема с конденсаторными связями показана на рис. 28. Она является модификацией схемы

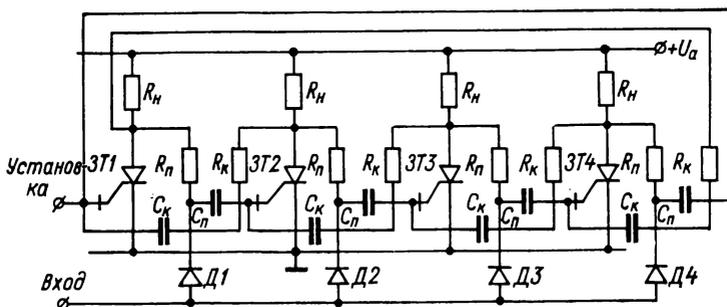


Рис. 28. Схема счетчика на запираемых тиристорах с емкостной коммутацией

на рис. 13. В отличие от этой схемы коммутирующий конденсатор включен между управляющим электродом предыдущего и анодом следующего тиристора. Пусть, например, включен запираемый тиристор 3Т2. Коммутирующий конденсатор емкостью C_k в его управляющей цепи заряжен до напряжения питания. При включении 3Т3 от входного импульса этот конденсатор начинает разряжаться через открытый тиристор 3Т3 и управляющий электрод 3Т2, создавая отрицательный импульс тока, достаточный для его выключения. Применение запираемых тиристоров в этой схеме дает ряд преимуществ. Если в схеме на обычных тиристорах перенос единицы из разряда в разряд приводит к появлению импульса помехи на анодах всех тиристоров, то в описываемой схеме это явление отсутствует. Кроме того, на анодах тиристоров в классической схеме появляются импульсы обеих полярностей, что объясняется подклю-

чением отрицательного напряжения конденсатора к аноду включенного тиристора. Затраты мощности на коммутацию значительные, так как конденсаторы емкостью C_k заряжаются через цепи нагрузки. Величина емкости этих конденсаторов велика. В схеме на ЗТ импульсы на анодах однополярны, потери мощности на коммутацию, габаритные размеры и номиналы конденсаторов меньше.

Считая сопротивление тиристора в закрытом состоянии намного большим сопротивления нагрузки, записываем выражение для потерь мощности на заряд конденсатора емкостью C_k (см. рис. 13):

$$P_{кI} = \frac{1}{R_n} (U_a - U_{ост})^2 e^{-2t/\tau_1}, \quad (65)$$

где $\tau_1 = R_n C_{к1}$.

Потери мощности на заряд конденсатора в схеме с ЗТ

$$P_{кII} = \frac{1}{R_n + R_k + R_{вн}} U_a^2 e^{-2t/\tau_2}, \quad (66)$$

где $\tau_2 = C_{к2} (R_n + R_k + R_{вн})$.

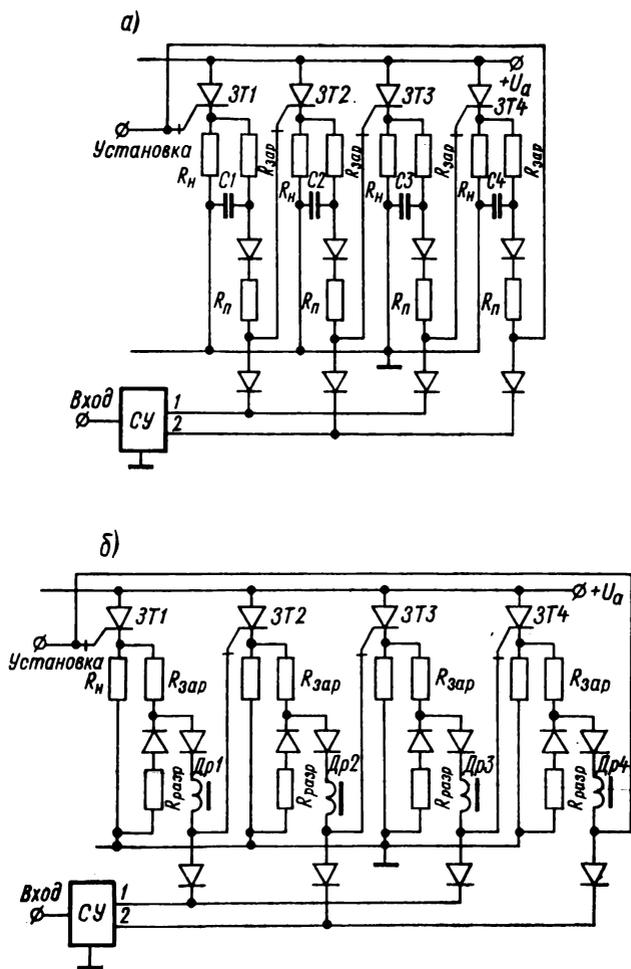
Разделив выражение (65) на выражение (66), получим

$$K = \left(1 + \frac{R_k + R_{вн}}{R_n} \right) e^{2t \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2}}. \quad (67)$$

Так как $\tau_1 \approx \tau_2$, а $R_k + R_{вн} \gg R_n$, то $K = K_{у. зап.}$

Коэффициент K характеризует относительную величину потерь на коммутацию в схеме с обычными тиристорами.

Большое распространение получили многотактные схемы на запираемых тиристорах. Две разновидности двухтактных схем показаны на рис. 29. Если в многотактных схемах на триодных тиристорах тактовые шины соединены с цепями нагрузки и коммутируют полный ток тиристора, то в многотактных схемах на запираемых тиристорах коммутируются цепи управляющих электродов. Это позволяет уменьшить мощность ключей в схеме управления. Цепи переноса в многотактных счетчиках на ЗТ могут быть емкостными, индуктивными и резистивными.



Двухтактная схема (рис. 29, а) с коммутацией управляющих цепей и с емкостными цепями переноса работает по методу выключения следующего разряда. Тактовые шины 1 и 2 служат для исключения переноса сигнала в следующий разряд при отсутствии управляющего сигнала. Состояние счетчика на время коммутации запоминается на конденсаторах.

Схема работает следующим образом. В исходном состоянии тиристор $3T1$ открыт и конденсатор $C1$ заряжен до напряжения питания. Шина 1 подключена к земле и исключает отпирание тиристора $3T2$. С приходом входного импульса шина 2 соединяется с землей, а шина 1 подключается к плюсу источника питания. Тиристор $3T1$ выключается, а $3T2$ включается током разряда $C1$.

Проведем анализ этой схемы. Считаем, что быстрое действие схемы управления таково, что за время, когда обе шины 1 и 2 закорочены на землю, существенного изменения напряжения на конденсаторе не происходит. Полное время восстановления схемы

$$t_{\text{вос}} = t_{\text{зар}} + t_{\text{разр}}. \quad (68)$$

Время заряда конденсатора

$$t_{\text{зар}} = (3 \div 5) \tau_{\text{зар}}, \quad (69)$$

где

$$\tau_{\text{зар}} = R_{\text{зар}} C. \quad (70)$$

Время разряда конденсатора состоит из двух составляющих:

$$t_{\text{разр}} = t_{\text{разр1}} + t_{\text{разр2}}. \quad (71)$$

В течение времени $t_{\text{разр1}}$ конденсаторы $C1—C4$ разряжаются как через управляющую цепь следующего тиристора, так и через последовательно соединенные резисторы сопротивлением R_n и $R_{\text{зар}}$ предыдущего тиристора. Это время равно времени включения тиристора $t_{\text{вкл}}$. В момент включения $3T2$ диод в цепи переноса закрывается и конденсатор продолжает разряжаться через резисторы сопротивлением R_n и $R_{\text{зар}}$ до полного разряда. Таким образом,

$$t_{\text{разр}} = t_{\text{вкл}} + (3 \div 5) \tau_{\text{разр}}, \quad (72)$$

где $\tau_{\text{разр}} = C (R_n + R_{\text{зар}})$.

Сопротивление резистора $R_{зар}$ ограничивается допустимым током через открытый тиристор и может быть найдено из неравенства:

$$R_{зар} \leq (U_a - U_{ост})/I_{у. доп} + R_n \quad (73)$$

Сопротивление резистора цепи переноса ограничивается допустимым током через управляющий электрод:

$$R_n \geq (U_a - U_{ост})/I_{у. доп} - R_n - R_{вн} \quad (74)$$

Емкость C конденсаторов $C1-C4$ определяется условием обеспечения тока спрямления на время включения тиристора:

$$C = \frac{2t_{вкл}}{(R_n + R_{вн} + R_n) \ln \{(U_a - U_{ост}) : [K_s I_{сп} (R_n + R_{вн} + R_n)]\}} \quad (75)$$

Схема с индуктивностью в цепи переноса, аналогичная рассмотренной, приведена на рис. 29, б. Включение следующего за проводящим тиристора осуществляется за счет энергии, накопленной в дросселе. Эта схема менее экономична, так как в установившемся процессе сопротивление дросселя постоянному току невелико и резистор с сопротивлением R_n оказывается подключенным параллельно сопротивлению нагрузки.

Время восстановления схемы определяется уравнениями (68), (69) и (72), а постоянные заряда и разряда соответственно равны:

$$\tau_{зар} = L_{др}/R_{зар}, \quad \tau_{раз} = L_{др}/(R_{вн} + R_n).$$

Для определения минимального сопротивления резистора $R_{зар}$ можно воспользоваться формулой (74). Индуктивность дросселя $L_{др}$ можно найти из вышерассмотренных соображений:

$$L_{др} = \frac{2t_{вкл} (R_{вн} + R_n)}{\ln \{(U_a - U_{ост})/K_s I_{сп} (R_{вн} + R_n)\}}.$$

Быстродействие рассмотренных схем может быть существенно повышено, если осуществлять коммутацию при неполном разряде коммутирующих элементов. Действительно, если переключение тактовых шин произойдет при неполном разряде C или L , сбоя схемы не произойдет, так как управляющий электрод тиристора, к которому подключен заряженный элемент, окажется зазем-

ленным через диод. Постоянная времени разряда уменьшается и становится равной:

для схемы на рис. 29, а

$$\tau_{\text{разр}} = CR_{\text{п}},$$

для схемы на рис. 29, б

$$\tau_{\text{разр}} = L/R_{\text{разр}}.$$

Учитывая, что заряд коммутирующего элемента следующего разряда протекает одновременно с разрядом коммутирующего элемента предыдущего разряда, максимальное время восстановления схемы можно уменьшить до времени заряда. Время разряда при этом должно быть заведомо меньше времени заряда, что всегда соблюдается в рассмотренных схемах.

Помехоустойчивость для счетчиков на запираемых тиристорах с реактивными элементами в цепях переноса выше, чем для аналогичных схем на триодных тиристорах. В однотактных схемах это объясняется отсутствием коммутирующих межанодных конденсаторов, вызывающих внутренние помехи в схеме; в многотактных схемах отсутствует статическая помеха из-за неидеальности характеристик диодов, шунтирующих входные цепи тиристоров. Так как эти диоды заземляют управляющий электрод, то очередной тиристор может включиться только после их запираения, когда статическая помеха исчезнет.

Рассмотренные схемы счетчиков с реактивными элементами в цепях переноса выгодно отличаются от аналогичных схем на триодных тиристорах, имеют более высокую помехоустойчивость и экономичность, однако не позволяют полностью использовать частотные свойства тиристоров. Применение многотактных схем на ЗТ позволяет устранить реактивные элементы и построить схемы с чисто резистивными связями. Эти схемы имеют преимущества по сравнению со схемами с резистивными и непосредственными связями на триодных тиристорах. Применение ЗТ, как указывалось выше, дает возможность избежать коммутации анодного тока, ограничиваясь коммутацией цепей управления. Это уменьшает мощность схем управления и еще в большей степени уменьшает потери на коммутацию. Так как в схемах с ЗТ запираение тиристоров принудительное, время их

выключения меньше, чем обычных тиристоров, выключаются уменьшением тока через них с помощью включенного последовательно с тиристором ключа схемы управления. Так как в большинстве многотактных схем счетчиков на ЗТ коммутируются только тактовые шины,

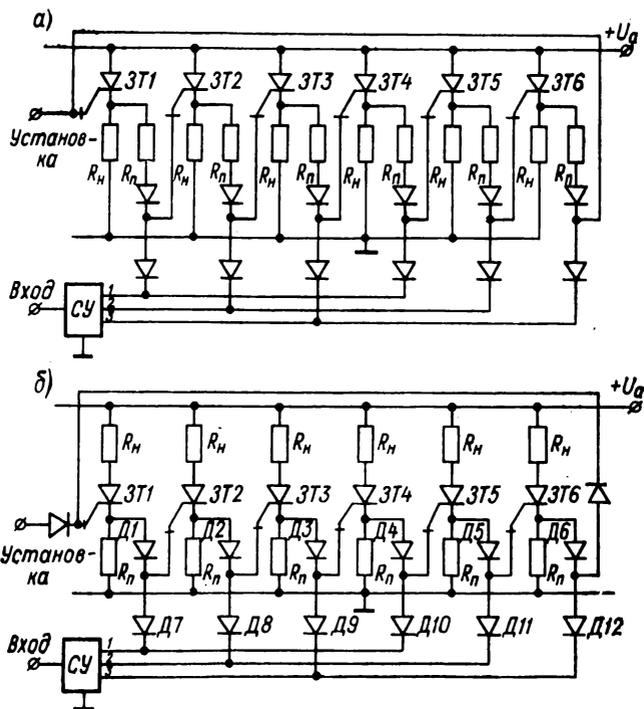


Рис. 30. Схема трехтактного счетчика на ЗТ: а — с катодной, б — с анодной нагрузкой

отсутствуют помехи от быстрого нарастания анодного напряжения что еще больше увеличивает надежность счетчиков на ЗТ. Безреактивные схемы реализуют все преимущества ЗТ только в схемах с катодной нагрузкой и при запираии по методу заземления управляющего электрода. При этом возможны две разновидности схем с запираиением ЗТ.

1. Запираиение осуществляется с помощью тактовых шин, подключающих минус источника питания к

управляющему электроду открытого тиристора после включения ЗТ следующего разряда. Такие схемы строятся как минимум трехтактными и имеют относительно сложную схему управления.

2. Запирание осуществляется включением тиристора следующего разряда. Счетчики, построенные по этому методу, имеют максимально простую схему управления, однако требуют дополнительного активного элемента (например, транзистора), который управляется напряжением нагрузки следующего разряда.

Рассмотрим схемы счетчиков на ЗТ с резистивными связями.

На рис. 30, а показана схема трехтактного распределителя импульсов с нагрузкой в цепи катода и с запирающим ЗТ с помощью тактовых шин. Рассмотрим работу схемы. В исходном состоянии все тиристоры заперты. Шины 1 и 2 закорочены на землю, к шине 3 подключен плюс напряжения питания. Импульсом по входу «установка» включается ЗТ1. Тиристор следующего разряда не может включаться, так как его управляющий электрод закорочен на землю. При поступлении на вход схемы управляющего импульса плюс напряжения питания подается на тактовую шину 1. При этом ЗТ второго разряда включается током, протекающим через ЗТ1, резистор R_n , диод Д 1, входную цепь ЗТ2 и сопротивление нагрузки. ЗТ третьего разряда открыться не может, так как его управляющий электрод закорочен на землю. Тактовая шина 3 подключается к земле, выключая ЗТ1. На этом переход единицы из первого разряда во второй заканчивается. Порядок коммутации тактовых шин показан в табл. 3. Так как в распределителе схемы $2/3$ всех тиристоров заземлены управляющими электродами, вероятность самопроизвольного отпирания тиристорov снижается и помехоустойчивость схемы возрастает. Статические помехи в схеме отсутствуют.

К. п. д. схемы в значительной степени определяется током нагрузки и коэффициентом усиления тиристора по цепи включения, так как ток через тиристор равен сумме тока нагрузки и тока цепи переноса. Резистор цепи переноса выбираем из условия:

$$I_y = \frac{U_a - U_{\text{ост. ЗТ}} - U_{\text{ост. д}}}{R_n + R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}} \geq I_{\text{спр}}, \quad (76)$$

Таблица 3

Шина	Разряд											
	1		2		3		4		5		6	
1	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
2	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
3	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+

откуда, вводя коэффициент запаса K_3 , получаем

$$R_{\pi} = \frac{U_a - U_{\text{ост } 3T} - U_{\text{ост. д}}}{K_3 I_{\text{спр}}} - R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}. \quad (77)$$

Полученную величину сопротивления R_{π} необходимо проверить по условию максимального допустимого тока через тиристор:

$$I_a = \frac{(R_{\text{н}} + R_{\pi})(U_a - U_{\text{ост } 3T})}{R_{\text{н}} R_{\pi}} \leq I_{a. \text{ доп}}. \quad (78)$$

Более высокий к. п. д. имеет схема на рис. 30, б. В ней сопротивления нагрузки включены в анодные цепи тиристоров, а перенос информации обеспечивается добавочными сопротивлениями R_{π} в катодных цепях тиристоров. Падение напряжения на этих сопротивлениях имеет место только в переходном режиме. Пусть, например, проводит тиристор $3T1$. Тактовые шины 1 и 2 заземлены, а шина 3 соединена с плюсом источника питания. Анодный ток тиристора $3T1$ протекает через диоды $D1$ и $D7$, минуя резистор R_{π} . С приходом управляющего импульса плюс подается на шину 1, диод $D7$ закрывается, через резистор сопротивлением R_{π} начинает протекать ток, часть которого ответвляется в управляющую цепь $3T2$, включая последний. Тиристор $3T1$ запирается после соединения шины 3 с землей.

Сопротивление резистора R_{Π} можно определить из условия надежного переноса информации по формуле:

$$R_{\Pi} = \frac{K_3 I_{\text{спр}} R_{\text{н}} R_{\text{вн}}}{(U_{\text{а}} - U_{\text{ост ЗТ}}) - K_3 I_{\text{спр}} (R_{\text{н}} + R_{\text{вн}})}. \quad (79)$$

Минимальное напряжение питания, при котором схема остается работоспособной, можно определить из уравнения (79) при $R_{\Pi} = \infty$:

$$U_{\text{а. мин}} = U_{\text{ост}} + K_3 I_{\text{спр}} (R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}). \quad (80)$$

Схемы распределения с запирающим ЗТ включенным тиристором следующего разряда описаны в [13].

Частотные свойства рассмотренных схем близки к частотным свойствам тиристоров. В двухтактных схемах максимальное время восстановления равно сумме времени включения и выключения тиристора:

$$t_{\text{вос}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}.$$

В трехтактных схемах это время может быть еще уменьшено, так как управляющий электрод тиристора оказывается заземленным в течение полутора тактов. Время выключения самого тиристора может быть уменьшено в некотором диапазоне за счет увеличения тока запираения.

12. Счетчики импульсов на тиристорных структурах, управляемых светом

Применение тиристорных структур, управляемых светом, позволяет существенно повысить помехоустойчивость и экономичность счетчиков, упростить их схемы и осуществить гальваническую развязку в управляющих и силовых цепях. Для этих целей в настоящее время наиболее часто используются незапираемые и запираемые тиристорные оптроны и фототиристорные переключатели.

С целью максимального использования частотных свойств тиристорных структур, управляемых светом, схемы счетчиков целесообразно выполнять с резистивными и непосредственными связями в цепях переноса. Выключение открытых тиристоров осуществляется при

этом коммутацией тактовых шин по анодным или катодным цепям для незапираемых тиристорных оптронов, коммутацией тактовых шин по управляющим цепям для запираемых тиристорных оптронов и частью анодного тока открытого фототиристора следующего разряда для фототиристорных переключателей. Светодиод тиристорного оптрона старшего разряда может включаться в анодную или катодную цепь фототиристора оптрона младшего разряда или непосредственно в цепь переноса между разрядами. В счетчиках на запираемых тиристорных оптронах возможно включение светодиода в цепь управляющего электрода запираемого фототиристора предыдущего разряда. Такое включение можно осуществить, так как время запираания фототиристора существенно меньше времени включения. Поэтому длительность импульса, запирающего фототиристор, достаточна для включения следующего фототиристора. Такие схемы имеют высокую экономичность, так как после запираания фототиристора ток по тактовым шинам не протекает.

Основные разновидности схем на незапираемых тиристорных оптронах показаны на рис. 31.

Схема на рис. 31, *а* выполнена с анодной нагрузкой и светодиодом, включенным в катодную цепь. Ток нагрузки в этом счетчике ограничен максимальным допустимым током светодиода. Схема работает следующим образом. При отрицательном потенциале на шине 1 и при положительном — на шинах 2 и 3 включается *ТО1*. Через светодиод *ТО2* протекает ток, однако *ТО2* не включается, так как светодиод *ТО3* заперт. Входной импульс переключает схему управления таким образом, что шина 2 соединяется с отрицательным потенциалом, а шина 1 с положительным. При этом *ТО2* открывается, а *ТО1* закрывается. Порядок переключения тактовых шин приведен в табл. 2. Светодиод может быть включен и в анодную цепь фототиристора. В этом случае, если необходимый ток нагрузки больше допустимого тока через светодиод, его можно включить параллельно нагрузке через ограничивающее сопротивление, обеспечивающее нужный режим работы светодиода.

Схема на рис. 31, *б* отличается от описанной тем, что сопротивление нагрузки включено в катодную цепь тиристора.

В схеме на рис. 31, в светодиод включен в цепь переноса между разрядами. Такое включение обеспечивает работу светодиода в импульсном режиме, а значит, уве-

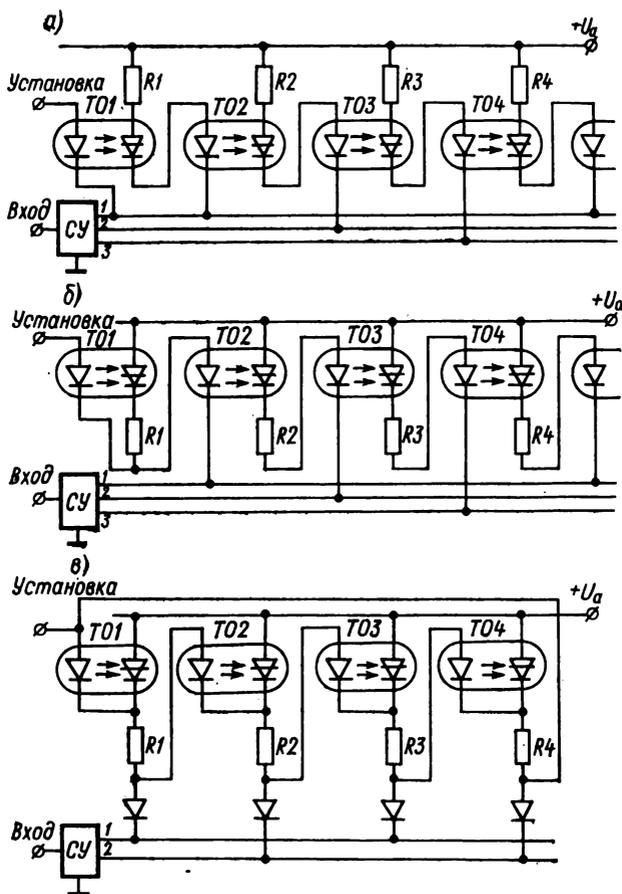


Рис. 31. Схемы счетчиков импульсов на тиристорных оптронах

личивает его срок службы. Действительно, если проводит $TO1$ (на шине 1 — минус, а на шине 2 — плюс источника питания), то все светодиоды заперты. При переключении тактовых шин анодный ток тиристора $TO1$ начинает протекать через светодиод $TO2$, обеспечивая

импульс света, необходимый для его включения. После этого напряжение на катоде светодиода тиристорного оптрона $TO2$ скачком увеличивается до напряжения питания и ток через него падает до нуля. Включением сопротивлений последовательно со светодиодами легко выбрать нужный режим их работы.

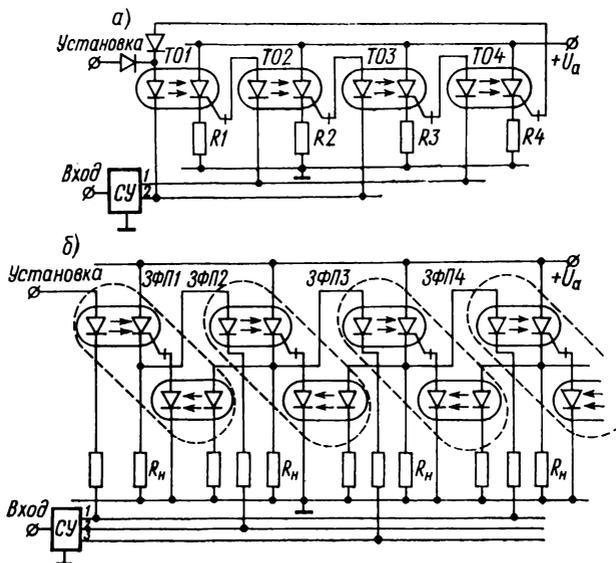


Рис. 32. Схема счетчика на тиристорных структурах, управляемых светом: а — на тиристорных оптронах, б — на фототиристорных переключателях

На рис. 32, а показана схема двухтактного распределения с катодными нагрузками на запираемых тиристорных оптронах [5]. Светодиоды в этой схеме включены в управляющие цепи запираемых фототиристоров. Как и счетчики на запираемых тиристорах, рассмотренные в предыдущей главе, эта схема не имеет помех от превышения допустимой скорости нарастания анодного напряжения, так как схемой управления коммутируются не анодные, а управляющие цепи. Схема работает следующим образом. В исходном состоянии на шине 2 — минус, а на шине 1 — плюс источника питания. Импульсом на вход «установка» включается $TO1$. При переключе-

чении тактовых шин схемой управления запираемый фототиристор оптрона $ТО1$ выключается током через его управляющий электрод и через светодиод оптрона $ТО2$. Как указывалось выше, длительность этого тока достаточна для включения фототиристора оптрона $ТО2$.

Более сложной является схема на запираемых фотопереключателях (рис. 32, б). При включенном запираемом фототиристоре фотопереключателя $ЗФП1$ тактовая шина 1 соединена с минусом, а шины 2 и 3 — с плюсом источника питания. Входной импульс подает через схему управления на шину 2 минус, а на шину 1 — плюс источника питания. Через светодиод переключателя $ЗФП2$ протекает импульс тока, включающий его. Напряжение на сопротивлении R_n возрастает до напряжения питания, и через светодиод тиристорного оптрона $ТО1$, входящего в структуру переключателя $ЗФП1$, протекает ток, обеспечивающий включение фототиристора оптрона $ТО1$. Управляющий электрод запираемого фототиристора оптрона $ЗФП1$ заземляется, и он запирается, отключая напряжение от нагрузки.

Рассмотренные схемы не исчерпывают многообразия счетчиков на тиристорных структурах, управляемых светом, однако в достаточной мере иллюстрируют возможности и достоинства схем, выполняемых на этих приборах.

13. Гибридные счетчики импульсов с тиристорными ключами

В ряде случаев простые надежные схемы счетчиков можно получить, комбинируя различные типы многослойных приборов и контактных реле. Двоичные ячейки в таких схемах выполняются на триодных или запираемых тиристорах, а в цепи переноса и коммутации дополнительно включаются контактные или бесконтактные ключи.

Хорошие эксплуатационные характеристики современных реле позволяют использовать последние вместе с тиристорами во многих счетных схемах. В зависимости от конструкции и принципа действия реле такие схемы могут выполняться одноктактными и многоттактными. В одноктактных счетчиках, как правило, используются реле с несколькими контактами. Это объясняется тем,

что контакты реле включаются как в цепь переноса, так и в цепь коммутации. Схемы на тиристорах и реле строятся таким образом, чтобы обмотки реле были включены в силовую цепь каждого тиристора. Наряду с достоинствами таких схем, заключающихся в простоте, высокой устойчивости к помехам в управляющей цепи, счетчики с реле имеют низкое быстродействие и критичны к скачкообразному уменьшению напряжения источника питания.

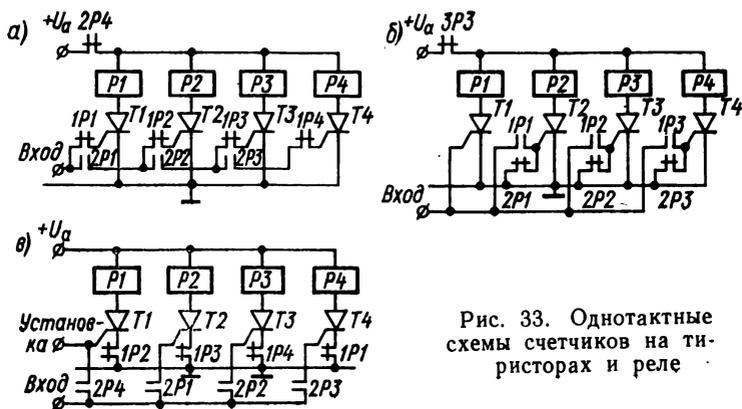


Рис. 33. Однотактные схемы счетчиков на тиристорах и реле

Основные схемы однотактных счетчиков на тиристорах и реле показаны на рис. 33. Счетчики со схемами, показанными на рис. 33, а и б, работают в накопительном режиме. С приходом первого управляющего импульса на вход схемы на рис. 33, а включается тиристор $T1$. Реле $P1$ срабатывает, его контакт $1P1$ размыкается, а контакт $2P1$ замыкается, образуя вместе с контактом $1P2$ цепь для включения тиристора $T2$. Следующий входной импульс поступает по этой цепи на управляющий электрод тиристора $T2$, включая его. Реле $P2$ срабатывает, разрывая цепь управления размыканием контакта $1P2$ и образуя цепь управления для включения тиристора $T3$ замыканием контакта $2P2$. После включения последнего тиристора $T4$ размыкающий контакт реле $P4$ размыкает цепь питания распределителя, возвращая схему в исходное состояние. Схема на рис. 33, б работает аналогичным образом, однако имеет более

высокую помехоустойчивость, так как управляющие электроды всех тиристоров, кроме подготовленного к включению, закорочены размыкающими контактами реле. Однако для управления этой схемой необходимы более мощные импульсы, так как входные цепи открытых тиристоров соединены параллельно.

Общим недостатком рассмотренных схем является то, что после переноса сигнала в последующий разряд тиристор предыдущего разряда остается включенным, так что по мере поступления входных импульсов число включенных тиристоров увеличивается. Это повышает мощность, потребляемую от источника питания.

Свободная от этих недостатков схема кольцевого распределителя показана на рис. 33, в. Импульсом, подаваемым на вход «установка», включается тиристор $T1$. При этом контакт $1P1$ реле $P1$, включенного в анодную цепь этого тиристора, замыкается, подготавливая цепь включения тиристора второго разряда, а контакт $2P1$ разрывает анодную цепь тиристора предыдущего разряда. Следующий входной импульс включает тиристор $T2$, срабатывает реле $P2$, один контакт которого $2P2$ готовит цепь включения тиристора $T3$, а второй $1P2$, размыкаясь, снимает анодное напряжение с тиристора $T1$, выключая его. Недостатком этой схемы является то, что контакты коммутируют силовые цепи тиристоров.

Общим условием, обеспечивающим нормальную работу трех рассмотренных схем, являются ограничения, накладываемые на длительность входных импульсов t_y :

$$t_{\text{нар}} + t_{\text{пер}} \geq t_y \geq t_{\text{нар}}, \quad (81)$$

где $t_{\text{нар}}$ — время, за которое ток в цепи тиристора нарастает до величины, большей тока выключения, $t_{\text{пер}}$ — время перелета контактов реле.

Минимальная длительность входных импульсов определяется уравнением:

$$t_{y, \text{мин}} = \tau \ln \frac{U_a - U_{\text{ост}}^{\dagger}}{U_a - U_{\text{ост}} - I_{\text{выкл}} R_n}, \quad (82)$$

где $\tau = L/R$, L и R — индуктивность и активное сопротивление реле.

В многотактных схемах указанные выше недостатки отсутствуют. Выключение тиристоров производится ключами схемы управления, а включение — потенциалом тактовых шин. Рассмотрим, например, схему на рис. 34, а. Пусть включен тиристор $T1$, шина 1 соединена с плюсом источника питания, шины 2 и 3 отключены или соединены с землей. Через обмотку реле $P1$

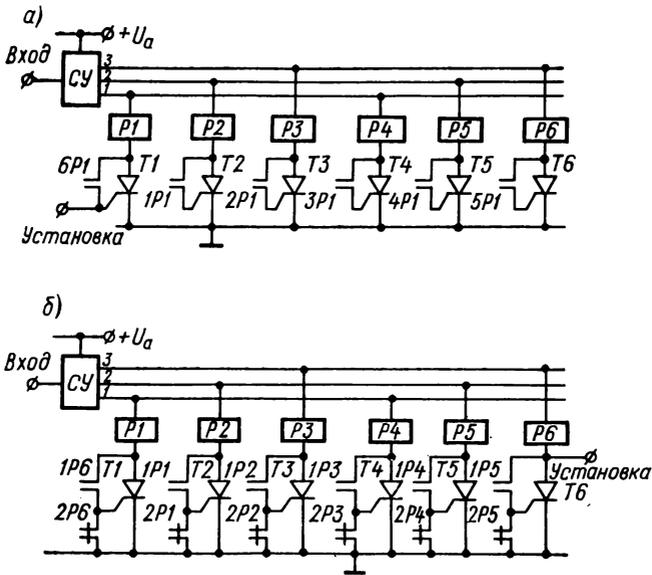


Рис. 34. Трехтактные схемы счетчиков на тиристорах и реле

протекает ток, его контакт $1P1$ замкнут и подготавливает тем самым цепи для включения тиристора $T2$. С приходом входного импульса шина 2 подключается к плюсу источника питания, включается тиристор $T2$, потенциал своего анода, шина 1 отсоединяется от плюса источника питания и тиристор $T1$ выключается. Длительность прикладываемого к управляющему электроду напряжения определяется только временем включения тиристора. После включения тиристора потенциал анода уменьшается до нуля и ток в управляющей цепи прекращается. Тем самым предотвращается перегрузка управляющих

цепей тиристорov. Так как в схеме используется только один контакт, можно применить геркон или тиристорный оптрон. В последнем случае светодиоды включаются в анодные цепи тиристорov, а фототиристоры — между анодом и управляющим электродом. Так как питание к тиристорам подключается полупроводниковыми ключами, целесообразно уменьшать скорость нарастания анодного напряжения тиристорov, несмотря на индуктивный характер нагрузки, или принимать меры по повышению помехоустойчивости относительно этого параметра. В качестве примера такой схемы может быть рассмотрена модификация предыдущего счетчика, показанная на рис. 34, б. В этой схеме управляющий электрод каждого тиристора зашунтирован размыкающим контактом того же реле. Так как выпускаемые промышленностью реле имеют как минимум пару контактов (размыкающий и замыкающий), то в целом схема не усложняется. А поскольку управляющие электроды тиристорov закорочены, помехоустойчивость схемы высокая. В единственном разряде, подготовленном ко включению, управляющий электрод отсоединен от земли, однако на аноде этого тиристора отсутствует напряжение питания, что исключает его ложное срабатывание. Запуск кольцевой схемы осуществляется отрицательным импульсом по входу «установка», подключенному к аноду тиристора последнего разряда. Реле *P6* при этом срабатывает, размыкая свой контакт *2P6* и замыкая контакт *1P6*. Тиристор *T1* включается своим анодным напряжением.

Общим недостатком рассмотренных схем является то, что обмотки реле включены непосредственно в рабочие цепи тиристорov. Это ухудшает частотные возможности счетчиков и приводит к перенапряжениям на тиристорах, возникающим в результате коммутации индуктивных нагрузок, какими являются обмотки реле. Кроме того, в каждый разряд включено одно реле. Используя реле с несколькими контактами, можно устранить эти недостатки.

На рис. 35 показаны схемы трехтактных распределителей с разделенными цепями обмоток реле и тиристорov. Схема на рис. 35, а выполнена на триодных тиристорах и работает следующим образом. Допустим, сигнал, поданный на вход «установка», включает тиристор

T1. Шина 1 при этом подключена к минусу источника питания. Реле *P1* находится под напряжением и его замыкающие контакты замкнуты, однако ток через них не протекает, так как на них нет напряжения. При поступлении сигнала на вход схемы управления тактовая шина 2 подключается к минусу источника питания, через замкнутый контакт *1P1* протекает ток, включающий тиристор *T2*. Тиристор *T3* не включается, несмотря на

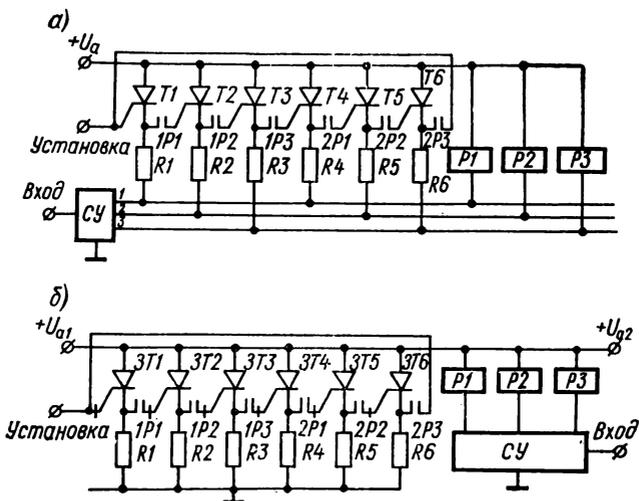


Рис. 35. Трехтактные схемы счетчиков с отделенными от нагрузки реле: *а* — на триодных незапираемых тиристорах; *б* — на запираемых тиристорах

то, что контакт *1P2* замкнут, так как шина 3 не подключена к минусу источника питания. При отключении от минуса источника питания шины 1 тиристор *T1* выключается. В этой схеме количество реле меньше числа тиристоров во столько раз, сколько замыкающих контактов в контактной группе реле. Схема на рис. 35, *б* выполнена на запираемых тиристорах. Контакты в цепи переноса служат как для включения, так и для выключения тиристоров. Цепи обмоток реле могут питаться как от общего с тиристорами источника, так и от другого источника. В исходном состоянии все тактовые шины отключены от минуса источника питания (табл. 4). В пер-

вом разряде записана единица. Передача этой единицы в следующий разряд осуществляется коммутацией тактовых шин в соответствии с табл. 4. Для перезаписи единицы первого разряда во второй шина 1 подключается к минусу источника питания. При этом срабатывает реле $P1$, замыкая все свои замыкающие контакты, однако включается только $ZT2$ частью анодного тока открытого $ZT1$ через контакт $IP1$. Затем шина 1 отключается от минуса источника питания, реле $P1$ обесточивается, его замыкающие контакты размыкаются. Теперь включены два ЗТ — первого и второго разряда. Далее к минусу подключается шина 3, срабатывает реле $P2$, замыкая свои замыкающие контакты. Управляющий электрод тиристора $ZT1$ заземляется через сопротивление нагрузки шестого разряда R_6 . Так как коэффициент усиления ЗТ по току выключения всегда больше единицы, величина сопротивления нагрузки достаточна для надежного выключения ЗТ. $ZT1$ выключается. Шина 3 отключается от минуса источника питания. Запись единицы во второй разряд закончена.

Таблица 4

Шина	Разряд											
	1		6		5		4		3		2	
1	—	—	+	+	+	—	—	—	+	+	+	—
2	+	+	+	—	—	—	+	+	+	—	—	—
3	+	—	—	—	+	+	+	—	—	—	+	+

Достоинство схемы — полная развязка силовых и управляющих цепей. Реле схемы управления находится под напряжением только в режиме коммутации тактовых шин. В установившемся режиме обмотки реле отключены. Контакты реле работают в облегченном режиме, так как включены в управляющие цепи тириستоров и размыкаются в обесточенном состоянии (после выключения ЗТ ток через контакт не протекает).

Так как характеристики электромеханических реле и управляемых светом структур имеют много общего в отношении независимости коммутируемых цепей и гальванической развязки входных и выходных сигналов, все схемы, реализованные на электромеханических реле с замыкающими контактами, можно построить с применением управляемых приборов. Использование волоконной оптики позволяет направлять световой поток от одного источника сразу к нескольким светоприемникам. Счетчики импульсов на этих бесконтактных приборах и тиристорах значительно превосходят аналогичные схемы на реле и тиристорах по быстродействию. По схемам они практически не отличаются от контактных аналогов.



ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РЕВЕРСИВНЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

14. Реверсивные счетчики импульсов на триодных тиристорах с импульсными цепями переноса

Преимущества тиристорных схем по сравнению со счетчиками на других полупроводниковых приборах наиболее ярко проявляются в реверсивном исполнении. В подавляющем большинстве случаев реверсивный вариант тиристорного счетчика выполняется на базе нереверсивной схемы добавлением цепей обратного переноса. Поэтому все принципы построения и расчетные соотношения, используемые в нереверсивных схемах, служащих исходными, пригодны и для соответствующих реверсивных счетчиков. Особенности реверсивных счетчиков импульсов заключаются как в специфических свойствах нереверсивных схем, используемых в качестве исходных, так и в методах реверса пересчета самих реверсивных схем.

В одноконтных счетчиках с импульсными цепями переноса наиболее широко используется метод реверса пересчета, заключающийся в том, что сигналы управле-

ния для прямого и обратного пересчета подаются на разные входы. Реверсивные счетчики строятся на базе нереверсивных добавлением цепей обратного пересчета.

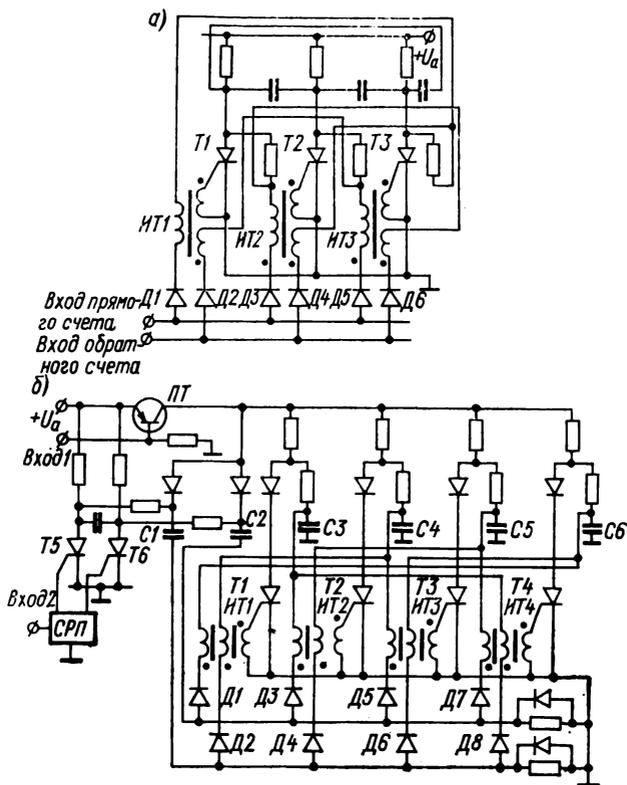


Рис. 36. Схема реверсивного счетчика с трансформаторными цепями переноса: а — с конденсаторной коммутацией, б — с коммутацией полупроводниковым ключом

Схемы с конденсаторными и трансформаторными цепями переноса рассмотрены в работе [5]. Цепи прямого и обратного пересчета симметричны относительно анода тиристора.

Основные схемы с трансформаторными связями представлены на рис. 36. В распределителе, схема которого

показана на рис. 36, а, для выключения тиристорov используются межянодные конденсаторы. Если сигнал при включенном тиристоре $T1$ поступает на вход прямого счета, то через диод $D3$, обмотку импульсного трансформатора $ИТ2$ и включенный тиристор $T1$ протекает импульс тока, включающий тиристор $T2$. Если сигнал поступает на вход обратного счета, ток входного импульса протекает через диод $D6$, обмотку трансформатора $ИТ3$ и тиристор $T1$, включая тиристор $T3$. Схема на рис. 36, б может работать в режиме кольцевого распределителя и сдвигающего регистра. Для запираения тиристорov используется включенный последовательно с ними ключ на транзисторе $ПТ$. Направление счета определяется состоянием тиристорov $T5$ и $T6$. Пусть, например, включен тиристор счетчика $T2$ и тиристор схемы управления $T6$. Все конденсаторы $C3—C6$ заряжены до напряжения питания, кроме $C4$, разрядившегося через открытый тиристор $T2$. Конденсаторы схемы управления $C1$ и $C2$ заряжены до напряжения питания. При поступлении положительного импульса на вход транзистора последний закрывается, прерывая ток в тиристоре $T2$. За время запертого состояния транзистора конденсаторы $C3—C6$ не успевают существенно разрядиться, так как обратное сопротивление диодов и закрытых тиристорov велико, а конденсатор $C2$ быстро разряжается через открытый тиристор $T6$. При восстановлении питания конденсатор $C2$ заряжается через обмотку трансформатора $ИТ3$ и открытый диод $D5$, включая тиристор $T3$. Диоды $D1$, $D3$ и $D7$ заперты положительным потенциалом конденсаторов. Для изменения направления пересчета схема реверса пересчета СРП включает тиристор $T5$, закрывая тиристор $T6$. Теперь при запираении $ПТ$ разряжается конденсатор $C1$, подготавливая цепь включения тиристора $T1$ через открытый диод $D2$ и импульсный трансформатор $ИТ1$.

Если необходимо сдвигать вправо или влево четко фиксированное число единиц, можно использовать схему, приведенную на рис. 37 [13]. Этот счетчик построен на базе схемы на рис. 13, но отличается порядком подключения цепей переноса и коммутации. Если в схеме на рис. 13 коммутирующие конденсаторы подключаются к разрядной ячейке с номером $i + 1$, то в рассматриваемой схеме они подключаются к ячейке с номером $i + n$,

где n — число одновременно включенных тиристоров в группе. В рассматриваемой схеме $n = 3$. В общем случае число n может быть произвольным, но кратным общему числу разрядов. В исходном состоянии тиристоры

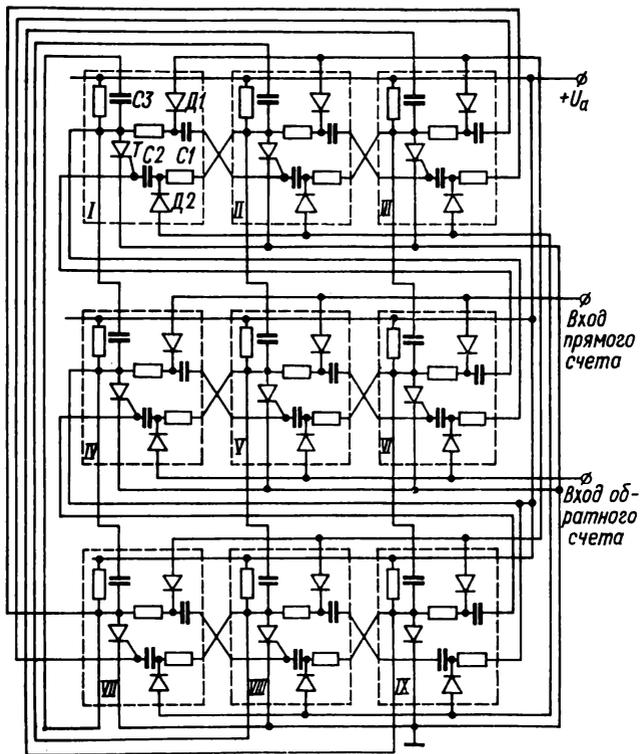


Рис. 37. Схема реверсивного счетчика, сдвигающего группу разрядов

T ячеек I—III включены (цепь установки не показана), тиристоры остальных ячеек закрыты. В таком положении конденсаторы $C3$, связанные с открытыми тиристорами, заряжены. Конденсаторы $C1$ и $C2$ ячеек I—III разряжены через открытые тиристоры, а конденсаторы остальных ячеек заряжены до напряжения питания. Если подать положительный импульс на вход прямого счета, то он пройдет только через открытые диоды $D1$

ячеек I—III на входы тиристоров T ячеек II—IV. При этом дополнительно включится тиристор ячейки IV, закрывая перезарядом коммутирующего конденсатора тиристор T ячейки I и подготавливая цепи переноса ячейки V. Таким образом, включенной остается группа тиристоров ячеек II, III и IV. Если в исходном состоянии подать импульс на вход обратного счета, то включится тиристор T ячейки IX, выключая тиристор ячейки III. Таким образом, остаются выключенными тиристоры ячеек IX, I и II.

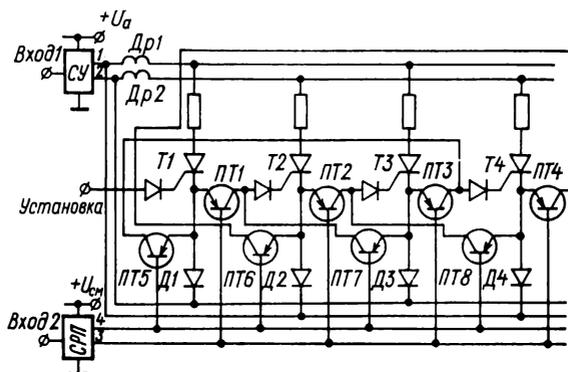


Рис. 38. Схема реверсивного счетчика с запоминающими дросселями

Схема кольцевого тиристорного распределителя с управляемыми ключами в цепях переноса показана на рис. 38. Для запоминания информации на время переключения тактовых шин используется энергия, накопленная в дросселях $Др1$ и $Др2$. Реверс пересчета осуществляется потенциалом, подаваемым на базы транзисторов, работающих в ключевом режиме. Пусть в исходном состоянии шина 1 подключена к плюсу, а шина 2 — к минусу источника питания. По входу «установка» включается тиристор $T1$. Для прямого пересчета на шину 3 подан отрицательный потенциал, а на шину 4 — положительный. При этом нечетные номера транзисторов ПТ открыты и работают в диодном режиме, а четные — надежно заперты. При поступлении входного импульса схема управления переключается: шина 2 соединяется с плюсом питания, а шина 1 — с минусом.

Однако тиристор $T1$ остается некоторое время открытым, так как через него протекает ток разряда индуктивности дросселя $Dr1$. Этот ток, проходя через открытый транзистор $ПТ1$ и входную цепь тиристора $T2$, включает последний. После разряда индуктивности тиристор $T1$ выключается. Для изменения направления счета потенциалы на шинах 3 и 4 меняются местами. Теперь оказываются открытыми нечетные номера транзисторов, а закрытыми — четные. Поэтому при переключении шин 1 и 2 ток разряда индуктивности протекает через $ПТ5$ и входную цепь тиристора $T4$, включая последний. Рассмотренная схема хорошо работает и от сети переменного напряжения, подаваемого на тактовые шины 1 и 2.

90

15. Реверсивные счетчики импульсов на триодных тиристорах с резистивными связями

Реверсивные счетчики импульсов с резистивными связями имеют все достоинства аналогичных нереверсивных схем. В зависимости от числа коммутируемых тактовых шин они могут быть двухтактными и трехтактными. Кроме схемы управления, служащей для переноса информации в следующие разряды, многотактные счетные схемы с резистивными связями имеют дополнительную схему реверса пересчета. Рассмотрим основные разновидности реверсивных счетчиков с резистивными связями в соответствии с классификацией, приведенной в первой главе.

На рис. 39 показаны две схемы, использующие для реверса счета подключение тактовых шин прямого или обратного пересчета к схеме управления. В схеме на рис. 39, а цепи переноса подключены к катодам тиристоров, что уменьшает влияние нагрузки на работу распределителя. В схеме на рис. 39, б цепи переноса соединены с анодами развязывающих диодов, что упрощает их. В этой схеме разделены нагрузки для цепей прямого и обратного переноса. Логика работы схемы реверса пересчета в этих счетчиках различная. В схеме на рис. 39, а при переключении, например, с прямого на обратный пересчет необходимо сначала соединить тактовые шины прямого пересчета 1 и 2 с минусом источника питания для исключения ложной передачи информации,

отключить шины 1 и 2 от тактовых шин 3 и 4 схемы управления, соединить шины обратного пересчета 1' и 2' с шинами 3 и 4, отключить тактовые шины 1 и 2 от минуса источника питания. В итоге тактовая шина 3 оказывается соединенной с шиной 1', а шина 4 — с шиной 2'. Каждое переключение тактовых шин 3 и 4 при-

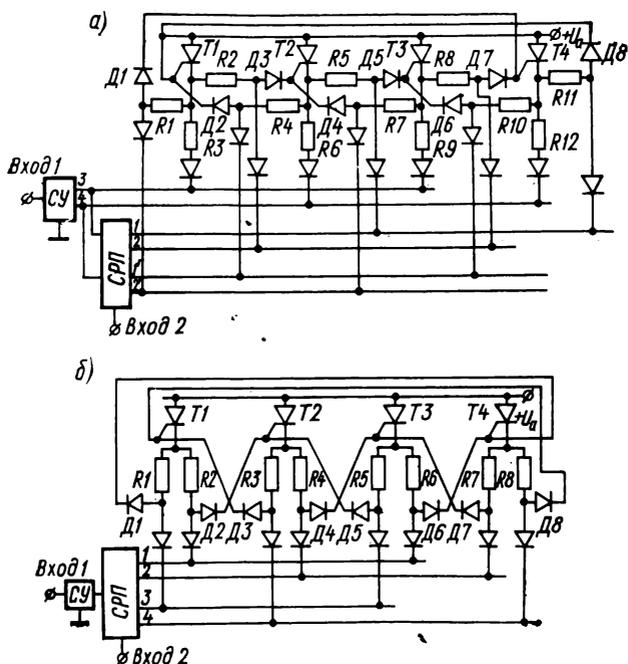


Рис. 39. Схема счетчика с реверсом, осуществляемым коммутацией тактовых шин: а — с общими нагрузками; б — с отдельными

водит к смещению единицы влево. Вправо единица передаваться не может, так как четные диоды, шунтируя сигнал прямого переноса на землю, исключают его передачу.

В схеме на рис. 39, б СПП работает по более простому алгоритму. Пусть схема работает в режиме прямого пересчета. При этом тактовые шины 3 и 4 соединены соответственно с шинами прямого пересчета 1 и 2. Для

переключения распределителя в режим обратного пересчета шины 1' и 2' подключаются к шинам 3 и 4, а затем шины 1 и 2 отключаются. Элементы цепей переноса рассчитываются аналогично элементам нереверсивной схемы (см. рис. 21). К. п. д. схемы, показанной на рис. 39, а, ниже, чем аналогичной нереверсивной схемы, за счет увеличения потерь в дополнительной цепи переноса. Без учета потерь на коммутацию к. п. д. нереверсивной схемы

$$\eta_{\text{нр}} = \frac{P_1'}{P_1 + P_2},$$

где P_1 — мощность, рассеиваемая в цепи нагрузки, P_2 — мощность, рассеиваемая в цепи переноса.

К. п. д. реверсивной схемы

$$\eta_{\text{р}} = \frac{P_1}{P_1 + 2P_2}. \quad (83)$$

К. п. д. реверсивной схемы на рис. 39, б практически такой же, как к. п. д. нереверсивной схемы, поэтому при работе распределителя в устройствах с большим входным сопротивлением реверсивная схема предпочтительна. Она же имеет более простую СРП.

На рис. 40 показаны две схемы, реализующие для изменения направления пересчета подключение к источнику питания анодных шин прямого и обратного пересчета. Эти схемы характеризуются тем, что содержат два тиристора в каждом разряде. Аноды тиристоров соединены с анодными шинами прямого 1 и обратного 2 пересчета. Схема на рис. 40, а работает без запоминания состояния распределителя после переключения шин направления пересчета. При переключении шин 1 и 2 информация заносится в тот разряд, с которого необходимо начать обратный пересчет. К. п. д. реверсивной схемы несколько ниже, чем нереверсивной, за счет потерь мощности во время коммутации в цепи управления дополнительного тиристора соседнего разряда. При этом на нагрузке соседнего разряда появляется импульс помехи. Действительно, пусть схема включена на прямой пересчет. При этом аноды четных тиристоров соединены с положительной шиной питания 1. При переключении

минуса источника питания с шины 3 на шину 4 ток тиристора $T1$ протекает как через управляющую цепь следующего разряда, так и через управляющую цепь тиристора $T8$ предыдущего разряда. При этом $T3$ следующего разряда отпирается, запирая диод $D2$ цепи переноса, а $T1$ ранее включенного разряда запирается,

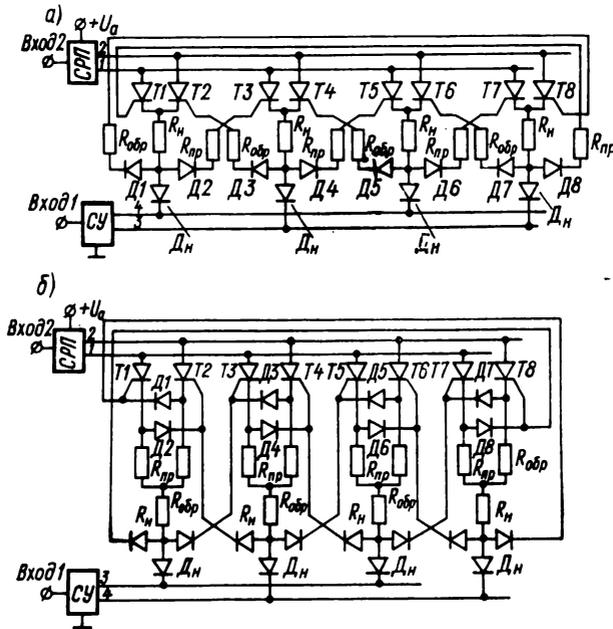


Рис. 40. Схема счетчика с реверсом, осуществляемым коммутацией анодных шин: а — без запоминания состояния, б — с запоминанием состояния

так как через него протекает ток, меньший тока выключения тиристора. Таким образом, нормальная работа схемы возможна при соблюдении условия:

$$I_{\text{выкл}} > \frac{U_a - \sum U_{\text{ост}}}{R_n + R_{\text{огр}} + R_{\text{вн}}} > I_{\text{спр}} \quad (84)$$

Величина напряжения помехи от протекания этого тока по нагрузке может быть ориентировочно определена

как

$$U_{\text{пом}} = I_{\gamma} R_{\text{н}} = I_{\text{доп}} R_{\text{н}} / K_{\text{вкл}},$$

где $I_{\text{доп}}$ — максимальный допустимый анодный ток тиристора, $K_{\text{вкл}}$ — коэффициент усиления тиристора по току включения.

Так как для большинства маломощных тиристоров $K_{\text{вкл}} = 50 \div 60$ и с совершенствованием технологии изготовления тиристорov имеет тенденцию к повышению, величина $U_{\text{пом}}$ не оказывает существенного влияния на качество работы счетчика. Время действия этой помехи равно сумме времени включения и выключения тиристора.

Схема на рис. 40, б работает с запоминанием состояния распределителя после реверса пересчета. Пусть включен тиристор $T3$. При реверсе пересчета шина 2 подключается к плюсу источника питания. Анодный ток тиристора $T3$ протекает через диод $D3$, управляющий электрод тиристора $T4$ и резисторы с сопротивлением $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{обр}}$, отпирая тиристор $T4$. Шина 1 отключается от плюса источника питания, прерывая ток в тиристоре $T3$. Распределитель готов к пересчету в обратном направлении.

Основное условие сохранения информации во включенном разряде при реверсе схемы при $R_{\text{пр}} = R_{\text{обр}}$:

$$\frac{U_{\text{а}} - U_{\text{ост}}}{2R_{\text{н}} + R_{\text{вх}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{н}} R_{\text{вх}} / R_{\text{пр}}} \geq I_{\text{спр}}. \quad (85)$$

Отсюда определим величину сопротивления резистора прямой цепи переноса

$$R_{\text{пр}} = \left[\frac{U_{\text{а}} - U_{\text{ост}} - U_{\text{д. н}}}{K_{\text{в}} I_{\text{спр}}} - R_{\text{н}} - R_{\text{вх}} - \sqrt{\left(\frac{U_{\text{а}} - U_{\text{ост}} - U_{\text{д. н}}}{K_{\text{з}} I_{\text{спр}}} \right)^2 - 4R_{\text{н}} R_{\text{вх}}} \right]. \quad (86)$$

Как и для предыдущей схемы, обязательно выполнение условия (84).

Рассмотренные схемы, использующие коммутацию анодных шин, просты, но требуют специального отбора тиристорov по параметрам управляющей цепи.

На рис. 41 приведены счетные схемы, использующие для реверса пересчета изменение порядка коммутации

тактовых шин. Такие распределители выполняются как минимум трехтактными. Схема на рис. 41, а выполнена на базе неререверсивного распределителя, схема которого приведена на рис. 22, б. Прямому направлению пересчета соответствует порядок коммутации тактовых шин 1—2—3, обратному — 1—3—2. Порядок изменения по-

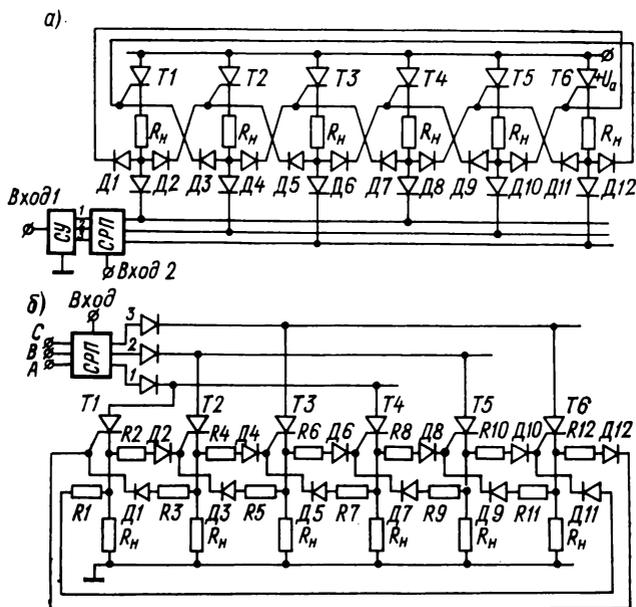


Рис. 41. Схема счетчика с реверсом, осуществляемым изменением порядка коммутации тактовых шин: а — на постоянном токе; б — на переменном токе

тенциалов на тактовых шинах для прямого и обратного пересчета показан соответственно в табл. 2 и 4. Применение трехтактного питания позволяет исключить сбой схемы, так как перенос из первого разряда в третий невозможен, ибо диод в цепи нагрузки шунтирует входную цепь неочередного тиристора.

Схема на рис. 41, б работает в динамическом режиме и питается от трехфазной сети переменного напряжения. Изменение направления пересчета осуществляется изменением порядка чередования двух соседних фаз.

Пусть, например, на тактовых шинах 1 , 2 и 3 соответственно напряжение фаз A , B и C . Тогда при протекании по нагрузке тиристора $T1$ тока от фазы A часть тока ответвляется в управляющую цепь тиристора $T2$, однако он закрыт, так как на его аноде отсутствует напряжение. Через интервал 120° на аноде $T2$ появляется напряжение и он включается, а тиристор $T1$ выключается через 60° . Аналогично передается информация в третий разряд и т. д. При изменении порядка чередования фаз (например, A , C , B) после первого включается тиристор шестого разряда.

Из рассмотренных схем наиболее перспективны счетчики, изменяющие направление пересчета коммутацией ключей в цепях переноса и изменением порядка коммутации тактовых шин питания. Они просты, надежны и не требуют отбора тиристоров.

16. Реверсивные счетчики импульсов на запираемых тиристорах и оптронах

Принципы построения реверсивных счетчиков на ЗТ и оптронах такие же, как и счетчиков на триодных тиристорах, однако первые коммутируются по цепи управляющего электрода, что обуславливает их энергетические и частотные преимущества. Трехтактная схема кольцевого распределителя, осуществляющая реверс с помощью изменения порядка коммутации тактовых шин, показана на рис. 42, *а*. По сравнению с нереверсивной схемой (см. рис. 30, *а*) в ней добавлены цепи обратного переноса и схема реверса пересчета. При подключении напряжения к тактовым шинам в порядке 1 , 2 , 3 осуществляется прямой счет. При коммутации шин в порядке 1 , 3 , 2 направление счета реверсируется. Порядок подключения потенциалов при счете в прямом направлении показан в табл. 3, а в обратном направлении — в табл. 4. Потери в реверсивном варианте схемы больше, чем в нереверсивном, на величину потерь в дополнительной цепи переноса. К. п. д. этой схемы определяется по формуле (83).

Двухтактная реверсивная схема с реверсом путем подключения к источнику напряжения тактовых шин прямого или обратного пересчета показана на рис. 42, *б*.

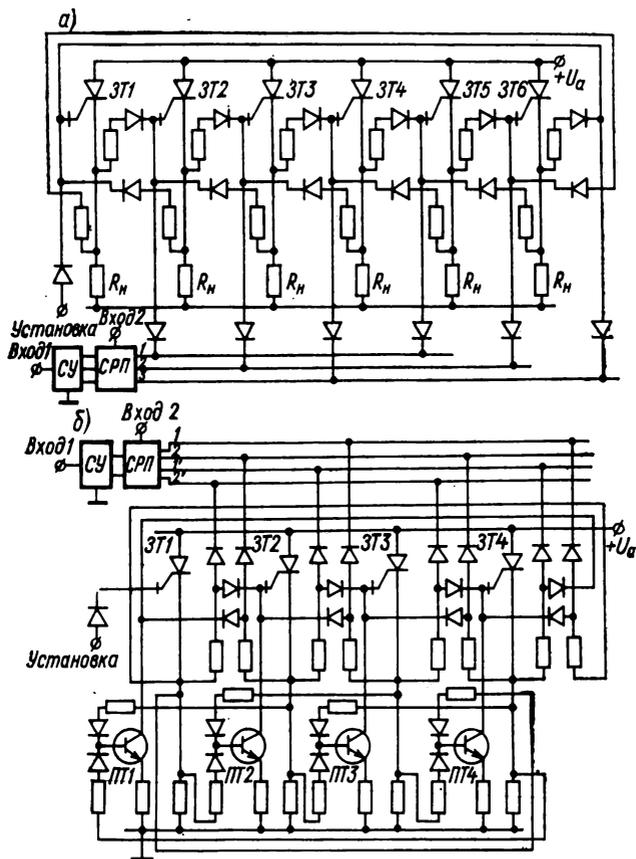


Рис. 42. Схема счетчика на ЗТ: а — с реверсом, осуществляемым изменением порядка коммутации тактовых шин; б — с реверсом, осуществляемым подключением к схеме управления тактовых шин прямого или обратного пересчета

Для счета в прямом направлении переключаются тактовые шины $1'$ и $2'$, при этом шины 1 и 2 подключены к минусу источника питания. Выключение ранее проводящего разряда как в прямом, так и в обратном направлении осуществляется одним и тем же транзистором, соединенным через диодную схему ИЛИ с катодом тиристоров предыдущего и последующего разрядов. Пусть, например, схема включена для счета в прямом направлении. Тогда тактовые шины 1 и 2 заземлены и исключают передачу информации в обратном направлении, а тактовые шины $1'$ и $2'$, поочередно переключаясь, сдвигают информацию, записанную в счетчике, вправо, как в нереверсивной схеме. При реверсе тактовые шины $1'$ и $2'$ заземляются, а шины 1 и 2 , поочередно переключаясь, сдвигают информацию влево. Как и в предыдущей схеме, реверсивный вариант счетчика несколько менее экономичен.

Частным случаем распределительных схем являются накопительные счетчики (рис. 43): с приходом управляющих импульсов на вход прямого счета (шины 1 и 2) число включенных разрядов последовательно увеличивается, а с приходом на вход обратного счета (шины 3 и 4) — последовательно уменьшается.

Аналогично схемам регистров и распределителей накопительные счетчики на ЗТ могут работать с анодными и катодными нагрузками. В схемах с анодными нагрузками используется два источника питания при резисторных цепях переноса. В схемах с катодной нагрузкой достаточно одного источника питания.

Реверсивный накопительный счетчик с анодными нагрузками (рис. 43, а) работает следующим образом. В исходном состоянии тактовые шины $1-4$ отключены. Импульсом по входу «установка» отпирается тиристор первого разряда $ЗТ1$. Если сигнал подается на тактовые шины 1 и 2 поочередно, то счет ведется в прямом направлении. Пусть тактовая шина 1 находится под положительным напряжением. При подаче этого напряжения на шину 2 к транзистору $ПТ2$ (который предварительно подготовлен к отпираанию базовым током, протекающим по включенному ЗТ первого разряда) подключается плюс питания, тиристор $ЗТ2$ включается, а $ЗТ1$ остается в проводящем состоянии. Таким образом, каждое переключение тактовых шин 1 и 2 включает

тиристор, ближайший к ранее открытому, увеличивая число включенных тиристоров на один. При обратном счете шины 1 и 2 отключаются от источника питания. Шины 3 и 4 поочередно подключаются к минусу дополнительного источника смещения $U_{см}$.

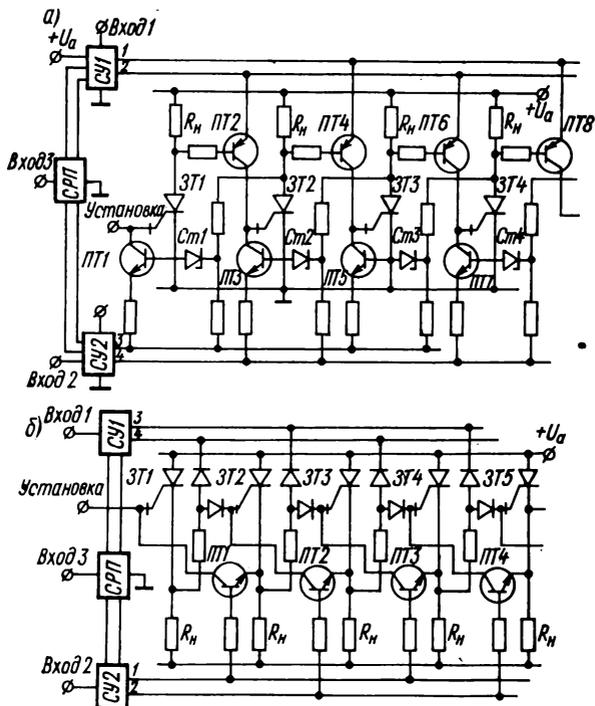


Рис. 43. Схема накопительного счетчика на ЗТ: а — с анодными, б — с катодными нагрузками

Пусть включены $3Т1$, $3Т2$ и $3Т3$. При подключении минуса источника смещения к тактовой шине 3 открыт только $ПТ5$ в управляющей цепи ЗТ третьего разряда, так как на базу $ПТ5$ поступает напряжение, равное сумме напряжения питания схемы и напряжения источника смещения, причем сумма этих напряжений больше напряжения пробоя стабилитрона. Все остальные транзисторы, соединенные с шиной 3, заперты, так как на

их базовые цепи подается напряжение, меньшее напряжения пробоя стабилитронов. Через открытый *ПТ5* протекает ток по цепи: управляющий электрод *ЗТ3*, *ПТ5*, шина 3,— и тиристор *ЗТ3* запирается. Каждое следующее подключение к минусу источника смещения шин 3 и 4 приводит к запираению одного тиристора, последнего в ряду включенных. Параметры цепей переноса и отключения выбирают аналогично соответствующим параметрам нереверсивных схем.

Схема реверсивного накопительного счетчика с катодными нагрузками показана на рис. 43, б. Цепь прямого переноса аналогична схеме на рис. 21, б. Схема работает следующим образом. При прямом счете тактовые шины обратного счета 1 и 2 отключены, а тактовые шины прямого счета 3 и 4 поочередно подключаются к минусу источника питания. Пусть в *ЗТ1* записана единица. Переключение тактовых шин 3 и 4 приводит к тому, что единица дополнительно записывается во второй разряд, при следующем переключении — в третий разряд и т. д. При обратном счете шины 3 и 4 подключаются к земле, исключая прямую передачу информации, а шины 1 и 2 поочередно соединяются с положительной шиной источника питания. Например, пусть единица записана в первые три разряда. При подключении шины 4 к плюсу источника питания отпирается только транзистор *ПТ3* в управляющей цепи *ЗТ3*, так как *ЗТ4* заперт и к эмиттеру этого транзистора подключен потенциал земли. Отпирание транзистора *ПТ3* приводит к шунтированию управляющего электрода *ЗТ* третьего разряда на землю через резистор сопротивлением R_n , и *ЗТ3* запирается. Тиристор *ЗТ1* первого разряда не выключается даже при открытом *ПТ1*, так как на эмиттере последнего — плюс напряжения источника питания. Запираясь, *ЗТ3* подготавливает цепь для запираения *ЗТ2*, снимая плюс источника питания с эмиттера *ПТ2*. Запирание *ЗТ2* происходит только после подключения тактовой шины 2 к плюсу источника. Далее процесс повторяется.

При использовании в цепях переноса реле или оптронов реверсивные счетчики можно получить из нереверсивных либо удвоением числа контактов реле или светоприемников, либо удвоением количества реле или источников световых импульсов. Как и в рассмотренных

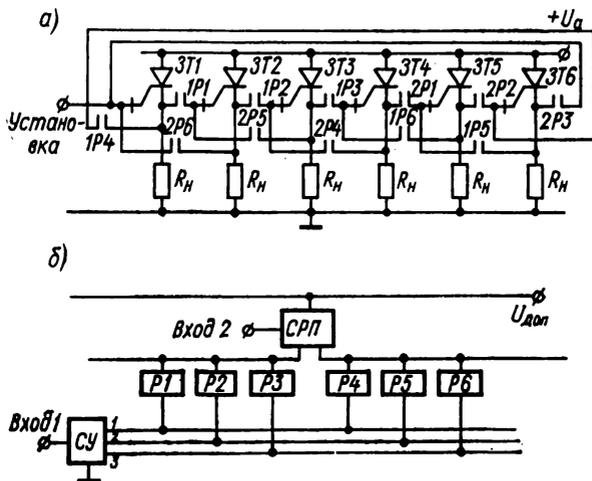


Рис. 44. Схема реверсивного счетчика на ЗТ с удвоением количества реле

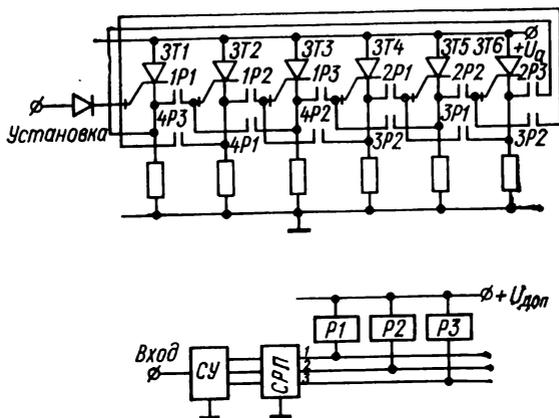


Рис. 45. Схема реверсивного счетчика на ЗТ и реле с реверсом, осуществляемым изменением порядка коммутации тактовых шин

Таблица 5

Шина	Разряд					
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0

Примечание. Нуль означает, что напряжение на шине отсутствует.

Таблица 6

Шина	Разряд					
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0

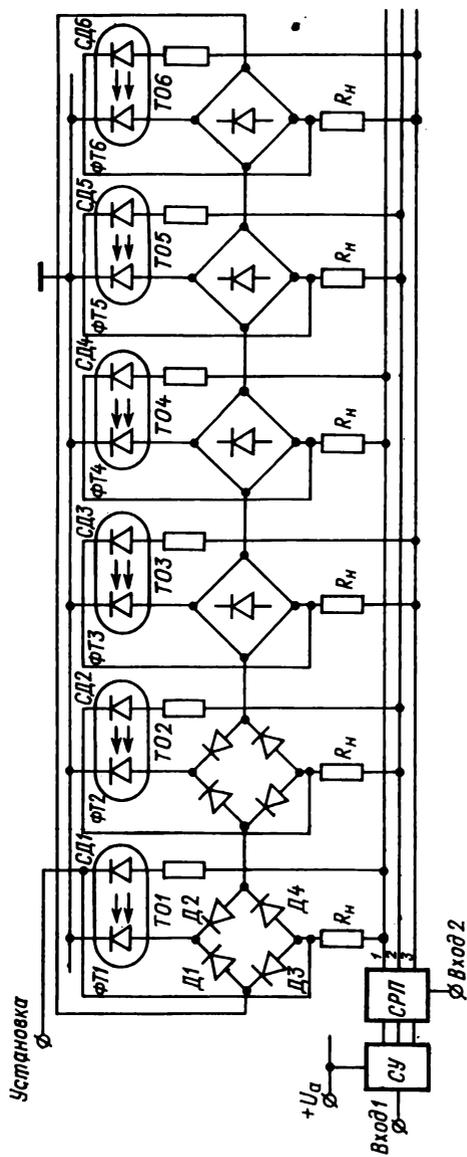


Рис. 46. Схема реверсивного счетчика на тиристорных оптронах

выше схемах, в реверсивном варианте счетчиков вводится дополнительная цепь переноса.

Реверсивный кольцевой распределитель с удвоением количества реле в схеме управления показан на рис. 44. При прямом счете через СРП к дополнительному источнику питания реле с напряжением $U_{\text{доп}}$ подключена общая точка реле $P1$ и $P3$. Работа схемы осуществляется при этом аналогично работе схемы счетчика на рис. 35. Для реверса пересчета на вход 2 подается сигнал, и группа реле $P1—P3$ отключается от плюса источника питания, а реле $P4—P6$ подключаются. Теперь при переключении тактовых шин 1, 2 и 3 коммутируются цепи обратного переноса и направление счета меняется.

Аналогичная схема, но с удвоением числа контактов и реверсом путем изменения порядка коммутации тактовых шин показана на рис. 45. Порядок переключения тактовых шин для прямого счета показан в табл. 5, а для обратного счета — в табл. 6.

Как и нереверсивные схемы с контактными реле, реверсивные их аналоги могут быть выполнены в бесконтактном варианте на тиристорных структурах, управляемых светом. Одна из таких схем показана на рис. 46. Реверс в этой схеме осуществляется изменением порядка коммутации тактовых шин. Рассмотрим ее работу. В исходном состоянии шина 1 соединена с плюсом источника питания, а шины 2 и 3 заземлены. При прямом счете порядок коммутации тактовых шин — 1, 2, 3. Отрицательным импульсом на входе «установка» включается тиристорный оптрон $TO1$. При этом через светодиод оптрона второго разряда $TO2$ протекает ток по цепи, состоящий из диода $D2$ моста первого разряда и открытого фототиристора $FT1$ оптрона $TO1$. Однако $TO2$ не включается, так как на шине 2 отсутствует напряжение. При подключении плюса к шине 2 включается $TO2$, подготавливая включение $TO3$, а $TO1$ запирается при отключении питания от шины 1. Для обратного счета при включенном тиристорном оптроне $TO1$ к плюсу питания подключается шина 3. А так как до этого через $СД6$ оптрона $TO6$ протекал ток, $TO6$ включается. Далее схема работает в порядке, аналогичном предыдущему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауэн Л. Ф. Бесконтактные переключатели и пересчетные схемы на тиристорах. Л., «Энергия», 1968. 92 с. с ил.
2. Балашов Е. П. Проектирование магнитных элементов и устройств ЭВМ. М., «Высшая школа», 1966. 344 с. с ил.
3. Бардиж В. В. Магнитные элементы цифровых вычислительных машин. М., «Энергия», 1974. 488 с. с ил.
4. Голубчиков А. М., Коломийцев А. К., Лагунович Е. Ф. Однотактный распределитель на тиристорах. А. С. № 216042 (СССР). Оpubл. — «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1968, № 14, с. 97.
5. Горохов В. А. Щедрин М. Б. Физические основы применения тиристоров в импульсных схемах. М., «Советское радио», 1972. 304 с. с ил.
6. Гусевский Ю. И. Кольцевые пересчетные схемы на тиристорах. ГОСИНТИ. 1967. 10 с. с ил.
7. Импульсные схемы на динисторах и тиристорах. М., «Наука», 1968. 240 с. с ил. Авт.: Р. В. Билик, и др.
8. Коротков А. М., Мочалов В. Д. Электронные счетчики импульсов. М., «Энергия», 1971. 360 с. с ил.
9. Коротков Л. М., Мочалов В. Д. Счетчики импульсов на динисторах. М., «Энергия», 1966. 104 с. с ил.
10. Кремниевые вентили. М., «Энергия», 1968. 304 с. с ил. Авт.: Ф. Г. Амелин, В. Б. Братолобов, И. В. Грехов и др.
11. Кузьмин В. А., Сенаторов К. Я. Четырехслойные полупроводниковые приборы. М., «Энергия», 1967. 184 с. с ил.
12. Лекоргийе Ж. Управляемые электрические вентили и их применение. М., «Энергия», 1967. 184 с. с ил.
13. Новыш П. А. Многоканальный реверсивный распределитель сигналов. А. С. № 278750 (СССР). Оpubл. — «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 26, с. 118.
14. Рахимов Г. Р., Хасанов П. Ф., Ходжиев Т. Регистр сдвига. А. С. № 351321 (СССР). Оpubл. — «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1972. № 27, с. 136.
15. Скаржепа В. А., Морозов А. А. Устройства автоматки на тиристорах. Киев, «Техніка», 1974. 224 с. с ил.
16. Скаржепа В. А., Морозов А. А. Построение и расчет ключевых схем на запираемых тиристорах с катодной нагрузкой. — «Известия вузов. Радиоэлектроника», том 17, 1972, № 1, с. 56—60 с ил.
17. Тиристоры (технический справочник). (Пер. с англ.) Изд. 2-е. М., «Энергия», 1971. 560 с. с ил.
18. Electronic counters south London Electrical Equipment Co Ltd. Pat. № 1114201 (Великобритания). Кл. G4A.
19. Lucas J. (Industries) Ltd. A. C. Control Circuit, Pat. № 1086313 (Великобритания). Кл. H2H.
20. Stumpe A. Schaltungordnung zur Verbesserung der Schalteigenschaften von Steuerbaren Halbleiterschaltern. Pat. № 1176193. (ФРГ) S. 92—95.
21. Sift registers. International Business machines Corporation. Pat. № 1128910. (Великобритания). Кл. G4C, H3T.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Характеристики тиристоров и их применение в счетчиках импульсов	5
1. Основные характеристики тиристоров	—
2. Разновидности тиристорных структур	12
3. Особенности работы тиристоров в счетчиках импульсов	16
4. Схемы коммутации тиристоров	22
5. Классификация и принципы построения тиристорных счетчиков импульсов	29
Глава вторая. Нереверсивные счетчики импульсов на триодных тиристорах	36
6. Особенности работы функциональных ячеек в тиристорном счетчике	—
7. Счетчики импульсов с конденсаторными цепями переноса	43
8. Счетчики импульсов с индуктивно-трансформаторными связями	52
9. Счетчики импульсов с резистивными и непосредственными связями	65
10. Динамические счетчики импульсов	73
Глава третья. Счетчики импульсов на четырехслойных $p-n-p-n$-структурах	78
11. Счетчики импульсов на запираемых тиристорах	—
12. Счетчики импульсов на тиристорных структурах, управляемых светом	88
13. Гибридные счетчики импульсов с тиристорными ключами	92
Глава четвертая. Реверсивные счетчики импульсов	99
14. Реверсивные счетчики импульсов на триодных тиристорах с импульсными цепями переноса	—
15. Реверсивные счетчики импульсов на триодных тиристорах с резистивными связями	104
16. Реверсивные счетчики импульсов на запираемых тиристорах и оптронах	110
Список литературы	119