

6  
А-56

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

Б.А. ГЛЕБОВ

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХОПЕРАЦИОННЫХ ТИРИСТОРОВ  
В ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ И СХЕМАХ

/№ 300 - применение электроники  
в народном хозяйстве и научных исследованиях/

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1968

Работа выполнена на кафедре промышленной электроники Московского ордена Ленина энергетического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент ЛУКИН А.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ГЛАЗЕНКО Т.А.

кандидат физико-математических наук СМОЛЯНСКИЙ Р.Е.

Оппонирующая организация указана в решении Учёного Совета.

Автореферат разослан 18.12. 1968 года.

Защита диссертации состоится в феврале 1969 года на заседании Совета при Московском ордена Ленина энергетическом институте.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу:

Москва, Е-250, Красноказарменная ул., 14, Совет МЭИ.

Дата защиты будет объявлена в газете "Вечерняя Москва".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Учёный секретарь Совета  
к.т.н., доцент

/АКСЕНОВ В.П./

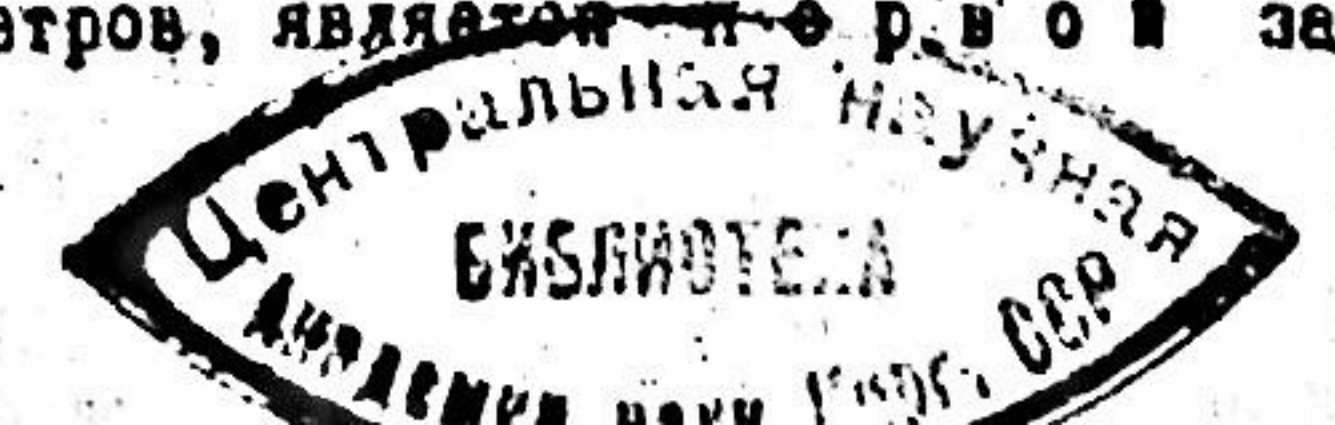
То новое, что внесли в технику двухоперационные тиристоры, - способность не только включаться положительным импульсным сигналом, поступающим на электрод управления, но также выключаться отрицательным, - открыло широкие перспективы для их применения в качестве ключевых элементов в электронных цепях. Свидетельство тому - налаженный в настоящее время серийный выпуск этих относительно молодых приборов в СССР и за рубежом.

Обычно после появления новых электронных приборов необходимо решить три основных задачи для того, чтобы эти приборы нашли практическое применение в качестве элементов схем. Это: исследование характеристик и свойств приборов; разработка принципов построения схем на их основе и разработка самих схем; исследование цепей, обеспечивающих управление приборами, и разработка методики расчета этих цепей.

Двухоперационные тиристоры применяются, главным образом, как ключевые элементы схем. Поэтому исследование процессов при переключении этих приборов представляет наибольший интерес для практики.

Общепринято представлять тиристор в виде сочетания PNP и NPN транзисторов, объединённых общим коллекторным переходом. Известно, что для возможности существования у прибора двух устойчивых состояний, необходимо, чтобы хотя бы у одного из составляющих транзисторов зависимость коллекторного тока от тока, поступающего в базу, была нелинейной. Существование такой нелинейности отмечается авторами ряда работ, но не учитывается при составлении дифференциальных уравнений, описывающих процессы в приборе на стадии регенерации.

Исследование переходного процесса в тиристоре при его включении с учетом нелинейности характеристик составляющих транзисторов, с целью представить прибор в виде некоторой эквивалентной схемы по отношению к внешним цепям и описать его свойства с помощью небольшого числа практически измеряемых параметров, является первоочередной задачей.



дачей, решаемой в диссертации.

Если переходные процессы в двухоперационных тиристорах при работе на активную нагрузку рассмотрены многими авторами, то вопросы влияния характера нагрузки на процессы коммутации приборов отражены в литературе недостаточно. Между тем, на практике, наряду с активной нагрузкой в анодной цепи тиристора, часто встречается комплексная. Поэтому исследование коммутационных процессов при комплексной нагрузке представляет интерес и является вторым рассматриваемым вопросом.

Среди публикаций по использованию двухоперационных тиристорov в импульсных схемах большая часть - это описание конкретных схем /типа патентных описаний/. Анализу общих принципов построения импульсных устройств на двухоперационных тиристорах в литературе не уделено достаточного внимания. Такой анализ по двум классам схем /триггерные устройства и формирователи импульсов/, составляет третий рассматриваемый вопрос.

Цепи управления двухоперационными тиристорами условно можно разделить на цепи включения и выключения, причем конструкции цепей включения подобны в случае применения обычных и двухоперационных тиристорov. Исследование ряда видов цепей включения, с целью связать параметры переходного процесса при отпирании прибора с его параметрами и параметрами элементов цепи включения, составляет четвертый вопрос, рассматриваемый в диссертации.

Стремление уменьшить коэффициент усиления эквивалентных транзисторов, образующих двухоперационный тиристор, с целью улучшения его способности выключаться отрицательным сигналом управления, вызывает ухудшение динамических свойств прибора при отпирании. Это может быть скомпенсировано путем введения внешней положительной обратной связи, осуществляемой трансформатором. Процесс отпирания тиристорov при дей-

ствии внешней обратной связи является пятым вопросом, исследуемым в диссертации.

Известны работы, в которых рассматриваются вопросы построения и расчета цепей выключения двухоперационных тиристорov. Однако, полученные в них результаты основаны на серьезных упрощающих допущениях, причем не анализируется вносимая ими погрешность и отсутствует экспериментальная проверка расчетных формул. Поэтому исследование ряда наиболее часто встречающихся видов цепей выключения и, связанной с этим, анализ процесса запираания двухоперационного тиристора при непрямоугольной форме тока управления составляет шестой вопрос, рассматриваемый в диссертации.

Результаты исследований изложены в пяти главах, причем весь материал разбивается на две части: анализ переходных процессов при переключении двухоперационных тиристорov и вопросы применения этих приборов в импульсных схемах. Главам, содержащимся в каждой из частей, предпосылается краткий обзор литературы, на основании которого сформулированы перечисленные выше задачи исследования.

## I

В первой главе диссертации анализируется переходный процесс при включении тиристора. При анализе используется модель прибора, представляющая его в виде сочетания *PNP* и *NPN*-транзисторов, объединенных общим коллекторным переходом. Особенность этой модели состоит в том, что эмиттерные переходы транзисторов зашунтированы сопротивлениями  $r_{ш1}$  и  $r_{ш2}$ , причем падения напряжения на открытых переходах полагаются постоянными и равными  $e_{31}$  и  $e_{32}$ . Токи  $\frac{e_{31}}{r_{ш1}}$  и  $\frac{e_{32}}{r_{ш2}}$ , протекающие по шунтирующим сопротивлениям, когда переходы открыты, обозначены соответственно  $I_1$  и  $I_2$ . Использование принятой модели равносильно кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик  $I_c = f(i_c)$

эквивалентных транзисторов, составляющих *PNPN*-структуру.

Показано, что для рассматриваемой модели характерны те же этапы процесса нарастания анодного тока, "физической" задержки и регенерации, которые наблюдаются при включении реальных приборов. На первом этапе, когда  $i_a(t) < I_1$ , работает только *NPN*-транзистор, а *PNP*-транзистор находится в режиме отсечки. На втором этапе, когда  $i_a(t) > I_1$ , оба транзистора работают в активном режиме, что обуславливает "внутреннюю" положительную обратную связь и лавинообразный характер нарастания анодного тока.

Анализ процесса включения проводится методом заряда /Л.1-3/. Дифференциальные уравнения, описывающие процесс, записываются в виде:

$$\frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_1}{\tau_{B1}} = \frac{Q_2}{\tau_{K2}} - I_1 \quad (1)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_2}{\tau_{B2}} = \frac{Q_1}{\tau_{K1}} + I_y - I_2 \quad (2)$$

$$\frac{Q_1}{\tau_{K1}} + \frac{Q_2}{\tau_{K2}} = I_a \quad (3)$$

где:  $Q_1$  и  $Q_2$  - неравновесные заряды неосновных носителей в *N* и *P* базах прибора;  $\tau_{B1}$  и  $\tau_{B2}$  - постоянные времени жизни носителей;  $\tau_{K1}$  и  $\tau_{K2}$  - постоянные времени, связывающие дырочную и электронную составляющие тока через коллекторный переход с зарядами баз ( $Q_1 = \tau_{K1} \cdot I_{KP}$  и  $Q_2 = \tau_{K2} \cdot I_{KN}$ ), причем, согласно /Л.1/, справедливы соотношения  $\tau_{B1} = \beta_1 \cdot \tau_{K1}$  и  $\tau_{B2} = \beta_2 \cdot \tau_{K2}$ , в которых  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - коэффициенты усиления базовых токов *PNP* и *NPN*-транзисторов.

Решение дифференциальных уравнений и анализ полученных решений, проведенные в главе, позволили сформулировать необходимые и достаточные условия для развития процесса включения тиристора при управлении импульсом тока прямоугольной формы и установить ряд закономерностей этого процесса. А именно:

Показано, что, как бы ни была велика продолжительность импульса тока управления, включение тиристора возможно только при условии, что амплитуда этого импульса превышает величину

$$I_{y,cm} = I_2 + \frac{I_1}{\beta_2} \quad (4)$$

которая может рассматриваться как параметр прибора и называется статическим током включения.

Установлено, что для обеспечения развития процесса при конечной длительности импульса управления прибор недостаточно только "подвести" к началу регенерации, а воздействие этого импульса необходимо продолжать некоторое время на этапе регенерации. Если  $t_y^*$  - длительность импульса управления амплитудой  $I_y^*$ , а  $t_{\varphi 3}$  - момент перехода от этапа физической задержки к этапу регенерации, т.е. момент, когда  $i_a(t_{\varphi 3}) = I_1$ , то для включения тиристора необходимо выполнение неравенства

$$t_y^* \geq t_{\varphi 3} + \tau_{рег} \cdot \ln \frac{I_y^*}{I_y^* - I_{y,cm}} \quad (5)$$

в котором  $\tau_{рег}$  - постоянная времени лавинообразного нарастания анодного тока во время этапа регенерации.

Доказано, что для развития процесса после окончания импульса управления достаточно, чтобы при  $t > t_y^*$  была положительна производная изменения заряда хотя бы в одной из баз прибора. Соотношение, связывающее амплитуду и длительность импульса управления, минимально-необходимые для обеспечения развития процесса включения при записывается в одной из двух равнозначных форм:

$$t_{y,min}^* \approx \tau_{акт} \cdot \ln \frac{I_{y,cm}^*}{I_y^* - I_{y,cm}^*} \quad (6)$$

или

$$I_{y,min}^* = \frac{I_{y,cm}^*}{1 - e^{-t_y^*/\tau_{акт}}} \quad (7)$$

Постоянная времени  $\tau_{акт}$  может рассматриваться как второй параметр при-

Показано теоретически и подтверждено экспериментом, что для реальных приборов при режиме уп. вления, близком к критическому (срав-несрав включения), характерен провал в кривой анодного тока, имеющий место после окончания импульса управления. Он является следствием нелинейности характеристик составляющих транзисторов. Для исключения провала, вызывающего увеличения коммутационных потерь при отключении, целесообразно включать прибор импульсами, заканчивающимися позже завершения стадии регенерации.

Условием включения тиристора в ряде работ [Л.3,4 и др.] считается накопление в базах прибора критических зарядов. Но если это справедливо, то, независимо от длительности импульса управления, амплитуда которого только-только обеспечивает включение тиристора, анодный ток в момент окончания этого импульса должен принимать одно и то же значение. Это значение в [Л.3] предложено называть "динамическим анодным током включения" ( $I_{a.вкл.дин.}$ ). Анализ и эксперимент показывают, что при уменьшении длительности управляющих импульсов  $I_{a.вкл.дин.}$  не остается постоянным, а возрастает. В режиме управления когда  $I_y > (2-3) \cdot I_{y.ст.}$ , зависимость  $I_{a.вкл.дин.}$  от  $t_y^*$  выражена слабо, что позволяет рассматривать величину  $I_{a.вкл.дин.}$ , измеренную в таком режиме, как значение анодного тока, после достижения которого развитие процесса гарантируется независимо от того, какова длительность управляющего импульса.

Показано, что при отпирании тиристора ступенькой тока управления нарастание анодного тока на этапе регенерации ( $I_a(t) > I_r$ ) можно описать приближенным выражением

$$I_a(t) \approx I_r + V_{рег.} \cdot (I_y^* - I_{y.ст.}) \cdot \left( e^{\frac{t-t_{рз}}{\tau_{рег.}}} - 1 \right), \quad (8)$$

в котором  $V_{рег.}$  и  $\tau_{рег.}$  - параметры, характеризующие регенеративную стадию процесса включения, а  $t_{рз}$  определяется выражением

$$t_{рз} \approx (\tau_{вкл.} - \tau_{рег.}) \ln \frac{I_y}{I_y^* - I_{y.ст.}} \quad (9)$$

Из выражения (8) следует:

$$t_H = t_{рз} + \tau_{рег.} \ln \left( 1 + \frac{I_a / V_{рег.}}{I_y^* - I_{y.ст.}} \right) \quad (10)$$

На основании сопоставления результатов анализа и экспериментальных данных, сделан вывод о том, что использование модели тиристора в виде сочетания  $PNP$  и  $NDN$  - транзисторов с общим коллекторным переходом и с шунтами параллельно эмиттерным переходам позволяет математически описать основные закономерности процесса нарастания анодного тока и представить зависимости  $t_{y.мин.} = f(I_y^*)$  и  $t_H = f(I_a, I_y^*)$  в аналитическом виде. Существенно, что в указанные зависимости входят величины  $I_{y.ст.}$ ,  $\tau_{вкл.}$ ,  $\tau_{рег.}$  и  $V_{рег.}$ , являющиеся практически-измеряемыми параметрами тиристора. Предложена методика их нахождения.

При практических расчётах удобно использовать упрощенную модель тиристора, представляющую прибор в виде источника лавинообразно-нарастающего тока, причём

$$I_a(s) = V_{рег.} \cdot \frac{I_y^*(s) - I_{y.ст.}}{s\tau_{рег.} - 1} \cdot e^{-st_{рз}} \quad (11)$$

В главе рассмотрен процесс включения тиристора с учётом влияния ёмкости центрального перехода. Из анализа следует, что влияние её проявляется в возрастании постоянной времени регенерации и увеличении длительности импульса управления, минимально-необходимой для отпирания прибора. Эксперимент и числовой расчёт показывают, что постоянные времени  $\tau_{рег.}$  и  $\tau_{вкл.}$  возрастают линейно с увеличением  $C_k$ ,  $R_a$ .

В главе исследовано включение тиристора при резистивно-ёмкостной нагрузке в анодной цепи ( $RC$  - цепь параллельно сопротивлению  $R_a$ ). При анализе тиристор представляется источником лавинообразно-нарастающего тока. Показано, что для рассматриваемого случая характерен выброс анодного тока при включении, причём амплитуда выброса, равная

$$I_{a, \text{ макс.}} = E_a \cdot \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R + \tau_{\text{pec}}/C} \right) = \frac{E_a}{R_{\text{эв}}} \quad (12)$$

не зависит от величины тока управления, а определяется напряжением питания и параметрами тиристора и нагрузки. Величина  $R_{\text{эв}}$  может рассматриваться как эквивалентное сопротивление нагрузки, связывающее изменение тока через прибор с изменением падения напряжения на нем во время стадии регенерации.

2

Во второй главе диссертации анализируется переходный процесс при запираии двухоперационных тиристоров в случаях активной и комплексной нагрузок в анодной цепи. При анализе используется та же модель прибора, что и в главе I.

Известно, что при выключении тиристора током по цепи управления прибор большую часть времени переходного процесса находится в режиме насыщения /Л.5,6 и др./ . Исследование работы тиристора в режиме насыщения проводится методом заряда. При составлении исходных дифференциальных уравнений заряды, накопленные в базах прибора, разделяются на граничные ( $Q_1$  и  $Q_2$ ) и избыточные ( $Q_{1H}$  и  $Q_{2H}$ ). Первые - связаны пропорциональной зависимостью с дырочной и электронной составляющими тока центрального перехода, и поэтому:

$$I_a = I_{kp} + I_{km} = \frac{Q_1}{\tau_{k1}} + \frac{Q_2}{\tau_{k2}} \quad (13)$$

Вторые - пропорциональны концентрациям неосновных носителей ( $P_{1k}$  и  $N_{2k}$ ) на границах центрального перехода, то есть:

$$Q_{1H} = S \cdot f_1 \cdot P_{1k}, \quad Q_{2H} = S \cdot f_2 \cdot N_{2k} \quad (14)$$

где  $S$  - площадь перехода, а  $f_1$  и  $f_2$  - коэффициенты, учитывающие толщины баз и закон распределения в них концентраций неосновных носителей.

Для расчета переходного процесса необходимо определить поведение зарядов  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_{1H}$  и  $Q_{2H}$ , что может быть сделано путем решения системы из четырех уравнений. Ее первым уравнением выступает выраже-

ние (13), в котором ток  $I_a$  определяется не динамикой изменения зарядов в базах тиристора, как при активном режиме работы прибора, а внешней цепью.

Второе и третье уравнения системы выражают баланс зарядов в базах прибора, а именно:

$$\frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_1}{\tau_{b1}} + \frac{dQ_{1H}}{dt} + \frac{Q_{1H}}{\tau_{b1H}} = \frac{Q_2}{\tau_{k2}} - I_1, \quad (15)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_2}{\tau_{b2}} + \frac{dQ_{2H}}{dt} + \frac{Q_{2H}}{\tau_{b2H}} = \frac{Q_1}{\tau_{k1}} + I_y - I_2, \quad (16)$$

где ток  $I_y$  записывается со знаком плюс, если втекает в базу, и - со знаком минус, если его направление обратно.

Разделение зарядов на граничные и избыточные, а также разделение постоянных времени граничного и избыточного зарядов ( $\tau_b$  и  $\tau_{bH}$ ) позволяет учесть зависимость коэффициентов усиления составляющих транзисторов от анодного тока в области его рабочих значений /Л.7/.

Четвертое уравнение системы можно получить, найдя связь между концентрациями неосновных носителей на границах центрального перехода. Показано, что запись граничных условий по Шокли ( $n = n_p \cdot e^{u/4}$ ), из которой можно установить указанную связь, является несправедливой в практически интересном случае, когда через прибор протекает ток. Поэтому используется запись граничных условий в форме, предложенной в работе /Л.8/. Применительно к двухоперационным тиристорам, у которых  $j_{kp} \ll j_{km}$ , граничные условия записываются в виде:

$$U_{pN} \cong \frac{kT}{q} \ln \frac{P_{1k}}{P_{k1}}, \quad (17)$$

$$U_{pN} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{2k}}{N_{p0}} - j_m \int_{x_p}^{x_N} \frac{dx}{q \mu_n n} \quad (18)$$

Согласно работе /Л.8/ для двухоперационных тиристоров в статике характерно отрицательное (в направлении протекания анодного тока) падение напряжения на центральном переходе, обусловленное вторым слага-

емым в выражении (18). В главе показано, что в динамике, при накоплении или рассасывании зарядов в базах, отрицательное напряжение - больше, чем в статике. Это позволяет предположить, учитывая (17), существование низкой концентрации дырок на границе  $N$ -базы и центрального перехода во время переходного процесса и, как следствие, выполнение неравенства  $Q_{нн} \ll Q_1$ . В этом случае работа тиристора в режиме насыщения описывается уравнениями (13), (15), (16), причем в уравнении (15) пренебрегается зарядом  $Q_{нн}$ .

При рассмотрении процесса выключения необходимо различать стационарный и нестационарный режимы запираания тиристора. Решение уравнений (13), (15), (16) для случая запираания тиристора прямоугольным импульсом тока при стационарном режиме и активной нагрузке в анодной цепи приводит к результату, ранее полученным в работах [Л.6,9]. Показано, что процесс рассасывания может быть описан единственным уравнением:

$$\frac{dQ_{нн}}{dt} + \frac{Q_{нн}}{T_{нн}} = I_{у.ст.} - I_{у} \quad (19)$$

при начальном условии  $Q_{нн}(0) = T_{нн} I_{у.ст.}$ , где

$$I_{у.ст.} = I_1 \cdot \frac{\beta_1 \beta_2 - 1}{\beta_1 \beta_2 + \beta_2} - \left( I_2 + I_1 \cdot \frac{1 + \frac{1}{\beta_1}}{1 + \frac{1}{\beta_2}} \right) \quad (20)$$

При активной нагрузке в анодной цепи нестационарный режим выключения имеет место в случае формирования коротких импульсов анодного тока. Для этого случая характерно повышение чувствительности к запирающим импульсам и сокращение времени выключения по сравнению со стационарным режимом. Получено приближенное выражение для  $t_{проц.}$

В главе показано, что для выключения тиристора при  $RL$ -нагрузке ( $R_0$  параллельно с  $RL$ -цепью) характерен ряд особенностей, состоящих в следующем:

- В случае, если промежуток времени между поступлением выключающего сигнала и моментом включения тиристора меньше  $(2 - 3)RL$ , запи-

рание прибора происходит при существенно большем анодном токе, чем в стационарном режиме, что обусловлено протеканием тока разряда конденсатора через открытый прибор. Из-за этого длительность процесса выключения возрастает, а чувствительность к управляющему сигналу уменьшается.

- При стационарном режиме выключения, значительной величине ёмкости конденсатора параллельно тиристор и  $R \rightarrow 0$  наблюдается некоторое сокращение времени выключения прибора и повышение чувствительности в сравнении со случаем чисто активной нагрузки.

- Стадия регенерации характеризуется более медленным нарастанием напряжения на аноде тиристора, чем при активной нагрузке. Показано, что приращение тока и падения напряжения на приборе связаны с помощью такого же эквивалентного активного сопротивления, как и при включении в случае  $RL$ -нагрузки в анодной цепи.

Для выключения тиристора при  $RLC$ -нагрузке ( $R_0 L$  и  $RL$ -цепи параллельно) характерен ряд особенностей, состоящих в следующем:

- При включении тиристора его ток достигает значения, определяемого выражением

$$i_a(t_{вкл.}) = \frac{E_a}{R_0 + L / T_{пер}} + \frac{E_a}{R + T_{пер} / C} = \frac{E_a}{R_{экв.}} \quad (21)$$

в котором первое слагаемое - ток в индуктивности в момент включения, а второе - ток  $RL$ -цепи. Ток  $i_a(t_{вкл.})$  может быть как больше  $\frac{E_a}{R_0}$ , так и меньше этой величины и поэтому, если отрицательный импульс управления поступает до завершения процессов в комплексной нагрузке, то выключение прибора может начинаться при токе, как большем установившегося значения, так и меньше этой величины.

- В случае  $RLC$ -нагрузки, как и в случае активной, за этапом рассасывания следует регенеративная стадия снижения анодного тока. Особенность выключения при  $RLC$ -нагрузке состоит в том, что изменение тока через прибор связано с изменением анодного напряжения равенством

$\Delta L_a = -\Delta L_a \cdot R_{z\alpha\beta}$ , в котором эквивалентное сопротивление  $R_{z\alpha\beta}$ , определяемое соотношением (21), может быть как больше  $R_a$ , так и меньше этой величины в зависимости от сочетания между параметрами тиристора и элементов комплексной нагрузки. При  $R_{z\alpha\beta} > R_a$  снижение анодного тока от  $\frac{E_a}{R_a}$  до нуля вызывает возрастание анодного потенциала до значения, большего  $E_a$  (индуктивный характер нагрузки), а при  $R_{z\alpha\beta} < R_a$  - до значения, меньшего  $E_a$  (емкостной характер нагрузки).

При индуктивном характере нагрузки и выполнении неравенства  $R_{z\alpha\beta} \gg R_a$  возможно явление "анормального" выключения. Оно внешне проявляется в том, что за этапом рассасывания не следует быстрый спад анодного тока, как при  $R_a$ -нагрузке, а ток через прибор уменьшается медленно, и этот процесс не носит регенеративный характер. Напряжение на аноде после окончания этапа рассасывания быстро (лавинобразно) возрастает до значительной величины (20-100 вольт за 1-2 мксек), а затем темп его нарастания резко замедляется (до долей-единиц вольт за мксек). Процесс медленного нарастания анодного потенциала и снижения анодного тока продолжается до тех пор, пока не рассеется энергия, накопленная в индуктивности нагрузки, чему соответствует спад анодного тока до нуля, или пока напряжение на аноде не достигнет значения, задаваемого целью ограничения анодного потенциала, если таковая присутствует в схеме. Во втором случае за моментом ограничения анодного напряжения сразу следует лавинобразное уменьшение анодного тока до нуля.

Явление "анормального" выключения вызывает резкое увеличение коммутационных потерь в тиристоре и мощности, необходимой для управления. В главе предлагается объяснение наблюдаемому явлению и способ его устранения. Показано, что для облегчения включения и выключения двухоперационного тиристора при индуктивном характере нагрузки в анодной цепи, целесообразно параллельно прибору включать цепочку, содержащую конденсатор  $C$ , последовательно с которым включены параллельно-соединенные диод и сопротивление  $R$ . Получены соотношения для выбо-

ра величин  $R$  и  $C$ .

При индуктивной нагрузке и наличии  $R-C$ -диодной цепи параллельно тиристору на его аноде после заперения появляется выброс напряжения. Показано, что амплитуда выброса может значительно превышать предельно-допустимое значение анодного потенциала. Для предотвращения этого необходимо применение цепей, ограничивающих напряжение на аноде. Приведены возможные варианты выполнения этих цепей.

3

В третьей главе диссертации анализируются принципы построения двух важнейших классов схем на двухоперационных тиристорах - триггерных устройств и формирователей импульсов. В главе описано более двадцати схем, среди которых большая часть разработаны в процессе выполнения диссертации.

Двухоперационный тиристор, подключенный через сопротивление нагрузки к источнику питания, может рассматриваться как простейшая триггерная схема. Ее недостаток состоит в том, что генераторы включающего и выключающего сигналов взаимно шунтирует друг друга. Поэтому основная задача, возникающая при конструировании триггерных устройств состоит в таком их построении, при котором указанное шунтирование частично или полностью устраняется. Это может быть достигнуто: использованием в цепи управляющего электрода тиристора ключевых элементов; разделением по различным каналам сигналов включения и выключения прибора; построением схемы, при котором включение и выключение тиристора осуществляется однополярными импульсами, поступающими на общий вход триггерного устройства.

Триггерные устройства с ключевыми элементами в цепи управляющего электрода двухоперационного тиристора можно разделить на три группы по способу размещения ключевого элемента.

К первой группе относятся схемы, в которых ключевой элемент со-



единён последовательно с источником входного сигнала, и коммутация тиристора осуществляется полностью за счёт энергии указанного источника. В главе рассмотрены три схемы этого вида с использованием в качестве ключевого элемента транзистора, тиристора и насыщающегося трансформатора.

Ко второй группе относятся устройства, в которых ключевые элементы связаны с управляющим электродом тиристора через конденсаторы. Коммутация прибора в таких схемах осуществляется за счёт энергии, накопленной в конденсаторах. При этом роль источников управления сводится к замыканию соответствующих ключей, через которые протекают токи разряда (заряда) конденсаторов, обеспечивающие коммутацию двухоперационного тиристора. В главе рассмотрены триггерные устройства этого вида, использующие в качестве ключевых элементов транзисторы, тиристоры, блокинг-генераторы.

К третьей группе схем относятся устройства, в которых анод двухоперационного тиристора подключён к положительной шине питания, а катод связан с нулевой шиной через сопротивление нагрузки. В таких схемах ключевой элемент (чаще всего вспомогательный тиристор) включается между управляющим электродом двухоперационного тиристора и нулевой шиной питания.

Создание триггерных устройств с разделением по различным каналам импульсов включения и выключения возможно потому, что существует два способа отпирания тиристора: положительным импульсом на управляющий электрод при заземлённом катоде (включение по электроду управления) и отрицательным импульсом на катод тиристора при связи управляющего электрода с нулевой шиной через сопротивление, а катода - через диод (включение по катоду). Используя включение тиристора по катоду и выключение по электроду управления, можно разделить цепи включения и выключения.

Триггерные устройства с управлением однополярными импульсными сигналами, поступающими на общий вход, можно разделить на две группы по способу коммутации двухоперационного тиристора. К первой группе относятся схемы, в которых включение прибора осуществляется по катоду, а выключение по управляющему электроду. Ко второй группе относятся схемы, в которых как включение, так и выключение осуществляются по управляющему электроду.

Схемы первой группы содержат тиристор, нагрузку в анодной цепи и диод в катодной, а также блок управления (БУ) с одним входом и двумя выходами, один из которых соединён с катодом тиристора, а другой - с управляющим электродом. При поступлении на вход устройства последовательности однополярных импульсов, БУ, в зависимости от предыдущего состояния тиристора (открыт он или заперт), передаёт импульсы в отрицательной полярности на управляющий электрод или катод прибора, чем обеспечивается его "направленная коммутация". В главе приведено две схемы первой группы. Их основным достоинством является простота и применение для построения только "стандартных" радиотехнических деталей (сопротивлений, конденсаторов, диодов).

Схемы второй группы содержат тиристор, нагрузку и блок управления, выход которого присоединён между управляющим электродом и катодом прибора, а вход является одновременно и входом схемы. При поступлении последовательности однополярных управляющих импульсов, БУ, в зависимости от исходного состояния тиристора, передаёт их либо в положительной, либо в отрицательной полярности. Показано, что для схем второй группы, не содержащих другого активного элемента, кроме двухоперационного тиристора, обязательным является присутствие трансформатора в блоке управления.

В главе рассмотрены несколько вариантов выполнения схем второй группы: с диодно-конденсаторной логической цепью "направленной коммутации", с логической цепью, образованной трансформатором на ферри-

товом сердечнике с прямоугольной петлей гистерезиса и др.

Любой формирователь импульсов на двухоперационном тиристоре можно представить в виде блок-схемы, содержащей этот прибор, нагрузку и цепь задержанной отрицательной связи (цепь ЗОС). При поступлении импульса положительной полярности на управляющий электрод тиристора, последний отпирается, и на нагрузку скачком передаётся напряжение питания. Одновременно в цепи ЗОС начинаются процессы, связанные с происшедшим изменением состояния схемы. Эти процессы приводят к тому, что через время, определяемое конструкцией и параметрами цепи ЗОС, на её выходе появляется импульс отрицательной полярности, выключающий тиристор, и формирование импульса на нагрузке заканчивается.

По выполнению цепи ЗОС формирователи можно разделить на две группы: только с пассивными элементами в цепи ЗОС и с применением в ней активных элементов (транзисторов, тиристоров и т.п.). В главе описаны схемы, относящиеся как к первой группе, так и ко второй.

4

В четвёртой главе диссертации рассмотрены некоторые виды цепей включения тиристоров и вопросы применения в тиристорных устройствах положительной обратной связи, осуществляемой трансформатором.

Показано, что запуск тиристора прямоугольным импульсом напряжения, передаваемым на управляющий электрод тиристора через сопротивление, не отличается от рассмотренного в главе I случая включения прямоугольным импульсом тока.

При передаче отпирающего сигнала через РС-цепь или дифференцирующий трансформатор, ток управления изменяется по закону:

$$i_g(t) = I_{y0} \cdot e^{-\frac{t}{T_g}} \quad (22)$$

Рассмотрено отпирание тиристора при такой форме импульса тока управления и получены выражения для длительностей этапа физической задерж-

жки ( $t_{пр}$ ) и регенеративной стадии процесса нарастания анодного тока ( $t_{ре}$ ). В выражениях присутствуют практически измеряемые параметры прибора. Рассчитана номограмма для определения  $t_{пр}$ . Показано, что включить тиристор можно быстрее, чем за определённое время, но медленнее - нельзя, то есть продолжительность процесса включения ограничена сверху.

В разделах главы, посвящённых исследованию вопросов применения трансформаторной положительной обратной связи, рассматриваются два способа включения трансформатора: параллельное и последовательное.

Независимо от способа включения трансформатора, исходные уравнения переходного процесса записываются в виде:

$$\frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_1}{T_{\delta 1}} = \frac{Q_2}{T_{\delta 2}} - I_1 \quad (23)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_2}{T_{\delta 2}} = \frac{Q_1}{T_{\delta 1}} + \beta_{oc} \cdot \left( \frac{Q_1}{T_{\delta 1}} + \frac{Q_2}{T_{\delta 2}} \right) + \gamma_{oc} \cdot I_{зоп} - (I_2 + I_2^*) \quad (24)$$

где  $I_{зоп}$  - амплитуда тока запуска. Что касается величин  $\beta_{oc}$ ,  $\gamma_{oc}$ ,  $I_2^*$ , входящих в уравнения, то они зависят от способа включения трансформатора и параметров схемы.

Решение записанных уравнений и анализ полученных решений позволили рассмотреть основные особенности включения тиристора при действии внешней положительной обратной связи. Показано, что возможно повышение чувствительности к импульсам запуска как по амплитуде, так и по длительности (особенно существенное при последовательном включении трансформатора). Лавинообразное нарастание анодного тока начинается сразу при поступлении входного сигнала и протекает быстрее, чем без внешней обратной связи.

Резкое увеличение чувствительности тиристора к полезному сигналу одновременно означает увеличение чувствительности к сигналу помехи. Предложен способ создания "пороговой" чувствительности к току запуска, причём величина порога "стандартизуется", то есть слабо за-

висит от свойств применяемых тиристоров.

Показано, что при параллельном включении трансформатора обратной связи первичную обмотку целесообразно подключать через конденсатор, и получено соотношение для выбора его ёмкости.

Установлено, что положительная обратная связь с параллельным включением трансформатора не только сокращает время отпирания, но также качественно улучшает процесс, увеличивая крутизну нарастания тока в нагрузке и уменьшая продолжительность медленных первого и третьего этапов. Использование параллельного включения трансформатора обратной связи целесообразно в том случае, если необходимо формировать на нагрузке импульс с крутым передним фронтом, а цепь запуска не в состоянии обеспечить форсированный режим управления.

Рассмотрены особенности процесса отпирания тиристора при последовательном включении трансформатора обратной связи. Показано, что процесс нарастания анодного тока разделяется на два этапа. Во время первого - происходит лавинообразное увеличение тока через прибор и снижение анодного потенциала. Схема с последовательным включением трансформатора обеспечивает чрезвычайно жёсткую положительную обратную связь, так как весь анодный ток, а не его часть, как при параллельном включении, участвует в её создании. Из-за этого развитие процесса на первом этапе происходит очень быстро даже при незначительной амплитуде сигнала управления.

Переход от первого этапа ко второму происходит в момент, когда тиристор начинает работать в режиме насыщения. К этому моменту ток дорастает до значения, которое определяется напряжением питания, сопротивлением нагрузки и включённым с ним последовательно сопротивлением, трансформируемым из вторичной обмотки в первичную. Соответствующим выбором параметров схемы можно добиться, чтобы указанное выше значение анодного тока составляло требуемую долю (например, 10-20%)

от установившегося. Дальнейшее нарастание анодного тока происходит за счет увеличения тока намагничивания трансформатора. Продолжительность этого процесса определяется индуктивностью первичной обмотки и сопротивлением нагрузки. Поэтому, если пренебречь длительностью короткого первого этапа, можно говорить о "стандартизации" времени нарастания анодного тока до установившегося значения, то есть о слабой зависимости этого времени от динамических свойств тиристоров.

Использование последовательного включения трансформатора обратной связи приводит к резкому сокращению коммутационных потерь при отпирании тиристора вследствие увеличения скорости спада анодного потенциала и из-за того, что основная часть процесса нарастания анодного тока приходится на время, когда тиристор уже работает в режиме насыщения, и падение напряжения на нём - мало.

Показано, что применение трансформатора, у которого сердечник имеет резко нелинейную петлю гистерезиса, и использование его в качестве "магнитного ключа" позволяет формировать в нагрузке импульсы тока с крутизной нарастания переднего фронта, недостижимой для прибора при "обычном" включении. Получены соответствующие расчетные выражения.

5

В пятой главе диссертации рассматриваются вопросы расчета цепей выключения двухоперационных тиристоров. Перед анализом конкретных видов этих цепей исследуются общие закономерности выключения приборов импульсами тока управления прямоугольной формы. Показано, что при спадающем и колоколообразном токе управления время выключения ограничено сверху, то есть выключить тиристор можно быстрее, чем за определенное время, но медленнее - нельзя.

Установлено (теоретически и экспериментально), что при выключении выполняется "принцип равенства зарядов", который состоит в том,

то, независимо от формы импульса тока управления, для выключения тиристора за заданное время  $t_{выкл}$  источник управляющего сигнала должен извлечь из Р-базы один и тот же заряд  $Q_{\bar{y}}(t_{выкл})$ . Зависимость  $Q_{\bar{y}}(t_{выкл})$  может рассматриваться как характеристика тиристора. Показано, что эта характеристика задаётся в аналитическом виде выражением:

$$Q_{\bar{y}}(t_{выкл}) = \frac{Q_{\bar{y}, крит.}}{1 - e^{-t_{выкл}/\tau_{выкл}}} \quad (25)$$

Предложена методика определения параметров  $Q_{\bar{y}, крит.}$ ,  $\tau_{выкл}$ . Найдено упрощенное аппроксимирующее выражение характеристики

$$Q_{\bar{y}}(t_{выкл}) = Q_{\bar{y}, крит.} \cdot \left(1 + 0,65 \cdot \frac{t_{выкл}}{\tau_{выкл}}\right) \quad (26)$$

Значения  $Q_{\bar{y}}(t_{выкл})$ , вычисленные по нему, отличаются от значений, вычисленных по (25), не более, чем на 5% при  $t_{выкл} < 2,3 \tau_{выкл}$ .

Используя "принцип равенства зарядов", расчёт  $t_{выкл}$  можно проводить по общей методике. А именно, если решить уравнения, описывающие процесс в цепи управления, и представить заряд  $Q_{\bar{y}}$ , извлекаемый этой цепью из Р-базы, как функцию времени  $Q_{\bar{y}}(t, R_1, R_2, \dots, R_n)$ , зависящую от конструкции цепи и параметров её элементов ( $R_1, R_2, \dots, R_n$ ), то выражение

$$Q_{\bar{y}}(t_{выкл}, R_1, R_2, \dots, R_n) = Q_{\bar{y}}(t_{выкл}) \quad (27)$$

характеристика цепи управления      характеристика тиристора

можно рассматривать как уравнение относительно искомого времени  $t_{выкл}$ .

Известно, что в процессе выключения входное сопротивление тиристора возрастает /Л.9/. При расчёте принимается обоснованное экспериментом допущение о линейности возрастания во времени входного сопротивления, а именно:

$$r_{bx}(t) = r_{bx,0} + \Delta r_{bx} \cdot \frac{t}{t_{выкл}} \quad (28)$$

В главе исследован режим запираания тиристора отрицательным сиг-

налом амплитудой  $E_{\bar{y}}$  (по напряжению), передаваемым через сопротивление  $R_{\bar{y}}$ , и получено выражение для определения  $t_{выкл}$ :

$$t_{выкл} = \tau_{выкл} \cdot \ln \frac{m \cdot I_{yo}}{m \cdot I_{yo} - Q_{\bar{y}, крит.} / \tau_{выкл}} \quad (29)$$

в котором:

$$I_{yo} = \frac{E_{\bar{y}}}{r_{bx,0} + R_{\bar{y}}}, \quad m = \frac{r_{bx} + r_{bx,0}}{\Delta r_{bx}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta r_{bx}}{r_{bx,0} + R_{\bar{y}}}\right) < 1$$

Рассмотрен случай выключения тиристора отрицательным сигналом, передаваемым через RC-цепь ( $R_{\bar{y}}$  и C). Получено уравнение относительно  $t_{выкл}$ :

$$E_{\bar{y}} \cdot C \cdot \left[1 - e^{-\frac{m \cdot t_{выкл}}{C(R_{\bar{y}} + r_{bx,0})}}\right] = \frac{Q_{\bar{y}, крит.} \cdot \frac{t_{выкл}}{\tau_{выкл}}}{1 - e^{-t_{выкл}/\tau_{выкл}}} \quad (30)$$

точное решение которого возможно графически или численными методами. Показано, что существует оптимальное значение ёмкости конденсатора RC-цепи, при котором энергия, затрачиваемая на запираание, - минимальна. Получено соотношение для определения  $C_{опт}$ .

Проведён анализ выключения тиристора при передаче отрицательного сигнала через RLC-цепь (разряд конденсатора на управляющий электрод через ключ и индуктивность). Рассмотрено запираание при расчёте энергии, накопленной в параллельном LC-контуре, подключённом между управляющим электродом и катодом тиристора через управляемый или неуправляемый ключ. Получены уравнения для расчёта  $t_{выкл}$ .

Материал, изложенный в рассмотренных выше главах диссертации, нашёл отражение в следующих работах:

Б.А. ГЛЕБОВ, И.Г. НЕДОЛУЖКО, В.В. КОСОВ. Переходной процесс при включении тиристорov. "Известия ВУЗов, Радиоэлектроника", 1967, т. 10, № 9-10.

Б.А. ГЛЕБОВ, И.Г. НЕДОЛУЖКО. Выключение тиристора током управления при R и RC-нагрузках в анодной цепи. Доклад на I-ой Всесоюзной Конференции по тиристорам, Москва, 1967.

Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Импульсные характеристики двухоперационных тиристоров и аппаратура для их исследования. ЦИТПО, № 1866-1753/153, ГОСНИТИ, 1966.

Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Выключение тиристора по электроду управления. Сб. статей "Полупроводниковые приборы и их применение", № 20, 1968.

В.В. ГАРШЕНИН, Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ, Г.В. КОШЕЛЯЕВ, И.Г. НЕДОЛУЖКО. Характеристики и параметры запираемых тиристоров. Доклад на I-ой Всесоюзной Конференции по тиристорам, Москва, 1967.

Б.А. ГЛЕБОВ. Включение тиристорov при действии трансформаторной положительной обратной связи. Доклад на I-ой Всесоюзной Конференции по тиристорам.

Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Статический триггер со счётным входом на двухоперационном тиристоре. Авт. свид. № 189222 по кл. 42m, 14 от 23.10.1965.

Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Триггер. Авт. свид. № 192242 по кл. 21a<sup>I</sup>, 36/18 от 04.10.1965.

Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Триггер. Авт. свид. № 190418 по кл. 21a<sup>I</sup>, 36/18 от 29.10.1965.

Б.А. ГЛЕБОВ, А.Г. ПОЛИКАРПОВ. Триггер. Авт. свид. № 187689 по кл. 21a<sup>I</sup>, 36/02 от 20.05.1966.

Б.А. ГЛЕБОВ, В.В. ПОПОВ. Тиристорное реле времени. Авт. свид. № 210939 по кл. 21g, 4/05 от 25.03.1967.

Б.А. ГЛЕБОВ. Формирователь импульсов на двухоперационном тиристоре. Авт. свид. по заявке № 1125957/26-9 от 14.01.1967. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР от 29.04.1968.

Б.А. ГЛЕБОВ. Ключевая схема на тиристорах. Авт.свид. по заявке № 1188237/26-24 от 05.10.1967. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР от 28.03.1968.

Б.А. ГЛЕБОВ. О выключении запираемых тиристорov при активно-индуктивной нагрузке в анодной цепи. "Известия ВУЗов, Радиоэлектроника", принята к печати.

Б.А. ГЛЕБОВ. Выключение запираемого тиристора при работе на комплексную нагрузку. Сб. статей "Полупроводниковые приборы и их применение", принята к печати.

Б.А. ГЛЕБОВ, В.Д. ГОЛИКОВ. Использование метода заряда для анализа работы тиристора в режиме насыщения. "Известия ВУЗов, Радиоэлектроника", принята к печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Beafay, J.T. Sparkes. The junction transistor as a charge controlled device. ATE Journal, October, 1957.

2. G.D. Bergman. The gate triggered turnon process in thyristors. Solidstate Electron, 1965, vol VIII, №9.

3. В.А. ГОРОХОВ. Переходные процессы включения триодных тиристорov. Труды XXI Всесоюзной научной сессии, посвящённой Дню радио, секция полупроводниковых приборов, Москва, 1965.

4. А.А. ЛЕБЕДЕВ, М.В. ПОПОВА, А.И. УВАРОВ, В.Е. ЧЕЛНОКОВ. Исследование процесса накопления заряда при включении тиристорov. "Радиотехника и электроника", 1967, т.12, № 10.

5. В.А. ГОРОХОВ. Переходные процессы при выключении тиристорov. Труды XXII Всесоюзной научной сессии, посвящённой Дню радио, Москва, 1966.

6. Б.А. ГЛЕБОВ, Э.С. МАЛАХОВ. Выключение тиристора по электроду управления. Сб. статей "Полупроводниковые приборы и их применение", 1968, № 20.

7. И.Г. Недолужко. Применение метода заряда для расчёта переходных процессов в импульсных и переключающих схемах на полупроводниковых триодах. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, МЭИ, 1964.

8. В.А. ГОРОХОВ, Г.В. КОШЕЛЯЕВ, Г.П. ТУЛУНКИН. Исследование падения напряжения на транзисторах и тиристорах в открытом состоянии. Сб. статей "Вопросы физики и применения тиристорov", МЛТИ, 1967.

9. Э.С. МАЛАХОВ. Двухоперационные тиристоры и их применение в импульсных и переключающих схемах. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, МЭИ, 1967.