

$$i_{\text{вх.мах}}(0) = i_{\text{вх.мах}}(t_2). \quad (15.24)$$

Диаграмма изменения входного тока (в обмотке  $w_2$ ) представлена на рисунке 15.7.б). Из изложенного следует, что реактор в данной схеме выполняет две основные функции: ограничивает максимальное значение тока, потребляемого регулятором от источника тока, являясь, таким образом, входным фильтром и накапливает энергию при замкнутом состоянии ключа для последующей передачи её в нагрузку. Последнее позволяет получать на выходе регулятора более высокое напряжение, чем входное. Связь средних значений входного и выходного напряжений выражается следующим соотношением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \left( 1 + \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{t_3}{t_p} \right) = U_{\text{вх}} \cdot \left[ 1 + \frac{w_1}{w_2 \cdot (q-1)} \right]. \quad (15.25)$$

Изменяя скважность  $q$  по определённому закону, можно регулировать выходное напряжение. Параметр  $w_1/w_2$  позволяет при проектировании регулятора согласовывать значения входного и выходного напряжений, однако при этом следует учитывать, что с уменьшением скважности растёт максимальное значение напряжения на ключевом элементе:

$$U_{\text{к.мах}} = \frac{U_{\text{вх.мин}} \cdot q_{\text{мин}}}{q_{\text{мин}} - 1}, \quad (15.26)$$

где  $U_{\text{вх.мин}}$  – минимальное входное напряжение, определяющее минимальную скважность  $q_{\text{мин}}$ .

При проектировании регулятора, рассчитав по (15.26) допустимую скважность  $q_{\text{мин}}$  при заданном значении  $U_{\text{вх.мин}}$  и значении  $U_{\text{к.мах}}$ , определяемым типом выбранного ключевого элемента, находят параметр  $m=w_1/w_2$ :

$$m = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх.мин}}}{U_{\text{вх.мин}}} (q_{\text{мин}} - 1). \quad (15.27)$$

Затем по заданному максимальному входному напряжению  $U_{\text{вх.мах}}$ , определяют максимальное значение скважности  $q_{\text{мах}}$ , используя формулу:

$$q_{\text{мах}} = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх.мах}} \cdot (m-1)}{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх.мах}}}. \quad (15.28)$$

Импульсные регуляторы на большие мощности разрабатываются обычно на основе тиристоров, которые выполняют функции ключевых элементов схемы.

Основным достоинством импульсных регуляторов является высокий КПД, обусловленный малыми потерями в регулируемом ключевом элементе. Следствием высокого значения КПД импульсных регуляторов является их хорошие массогабаритные показатели. В то же время наличие высокого уровня пульсации при регулировании вызывает необходимость в увеличении коэффициента сглаживания фильтров регулятора, однако последнее может быть реализовано при сравнительно небольшой установленной мощности элементов фильтра, если повысить рабочую частоту регулятора до рациональных значений для каждого конкретного случая.

## *Лекция №16. Статические контакторы.*

### **16.1. Тиристорные контакторы переменного тока.**

Для коммутации силовых цепей переменного тока разработано много различных типов электрических аппаратов: автоматические выключатели, электромагнитные контакторы и др. Большинство из них основано на механическом взаимодействии отдельных уз-

лов и деталей. Наличие подвижных узлов и деталей обуславливает инерционность процессов замыкания и размыкания электрических контактов. Обычно время включения и выключения таких аппаратов находится в диапазоне от десятых до сотых долей секунды, в зависимости от типа коммутационного аппарата.

Полупроводниковые ключевые элементы позволяют существенно повысить быстродействие коммутационных аппаратов. С этой целью разработан ряд схем, так называемых бесконтактных коммутационных аппаратов, выполненных преимущественно на основе тиристоров. В литературе такие аппараты часто именуется тиристорными контакторами. Отсутствие подвижных частей и металлических контактных соединений делает эти устройства значительно более надёжными и быстродействующими. Кроме того, как и все схемы с полупроводниковыми приборами, они обладают большим сроком службы.

В простейшем исполнении силовая часть однофазного тиристорного контактора представляет собой два встречно - параллельно включенных тиристора (рис. 16.1) или один симметричный тиристор. Если тиристоры проводят ток, то контактор включен. Если тиристоры ток не проводят, то он выключен. Так как ток переменный, то одну полуволну тока проводит тиристор VS1, а вторую – VS2. Силовая схема такого контактора подобна силовой схеме регулятора переменного напряжения, изображённого на рис. 14.2. Различие между ними заключается в законе управления тиристорами. В регуляторе управляющие импульсы на тиристор поступают с различными углами управления  $\alpha$ , а в контакторе таким образом, чтобы каждый тиристор проводил одну или несколько полуволн тока, либо оба тиристора были выключены.

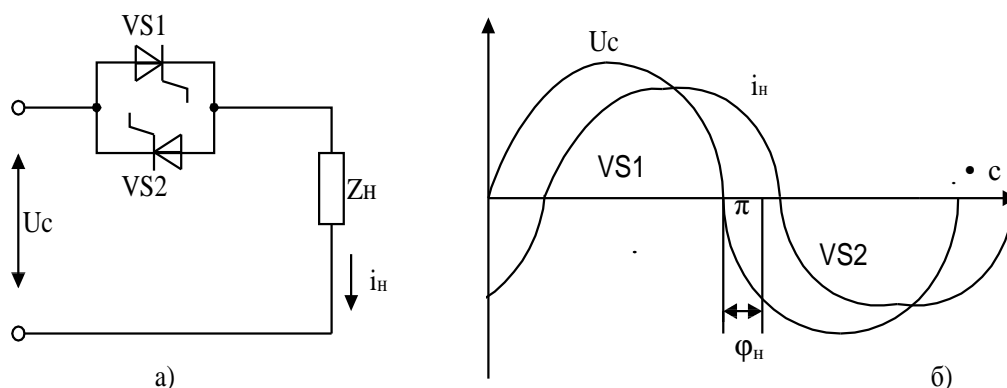


Рис. 16.1. Тиристорный контактор с естественной коммутацией:

а) Принципиальная схема

б) Диаграмма напряжения и тока при включенном контакторе.

Поскольку тиристор является незапираемым по управлению элементом, для его выключения необходимо обеспечить спадание тока до нуля. Если контактор включен в цепи с активным сопротивлением, то моменты прохождения через ноль тока и напряжения совпадают. При активно-индуктивной нагрузке ток отстаёт от напряжения, переход тока с одного тиристора на другой происходит позже на угол  $\phi_n$ , который определяется коэффициентом мощности нагрузки (рис. 16.1.б). Для того, чтобы выключить тиристор раньше прохождения тока коммутируемой цепи через ноль, необходимо применять искусственную коммутацию тиристорov.

В зависимости от того, выключаются тиристоры под воздействием естественного снижения переменного тока до нуля или посредством их искусственной коммутации, различают тиристорные контакторы с естественной коммутацией (ТКЕ) и искусственной коммутацией (ТКИ). Для того, чтобы выключить ТКЕ, достаточно прекратить подачу управляющих импульсов на тиристоры. В этом случае максимальное время выключения тиристорov не будет превышать половины периода выходного напряжения. Например, ес-

ли прекратить подачу управляющих импульсов в момент включения очередного тиристора, то он будет проводить полуволну тока в течение  $180^\circ$ , а другой тиристор уже не сможет включиться из-за отсутствия управляющего импульса.

При необходимости иметь время выключения меньше, чем половина периода выходного напряжения, следует применять ТКИ, однако в этом случае возникает проблема отвода энергии, накопленной в индуктивностях нагрузки, при обесточивании цепи, соединяющей источник электрической энергии с нагрузкой. Для устранения перенапряжений следует в случае применения ТКИ предусматривать возможность отвода или сброса энергии, накопленной в индуктивностях нагрузки в какой-либо приёмник или накопитель электрической энергии. В частности, таким приёмником может служить конденсатор или источник переменного тока, способный принимать электрическую энергию.

На рис. 16.1.а представлена схема ТКИ, в которой отключение основных тиристоров VS1 и VS2 производится с помощью колебательного контура, элементами которого являются конденсатор Cк и реактор Lк.

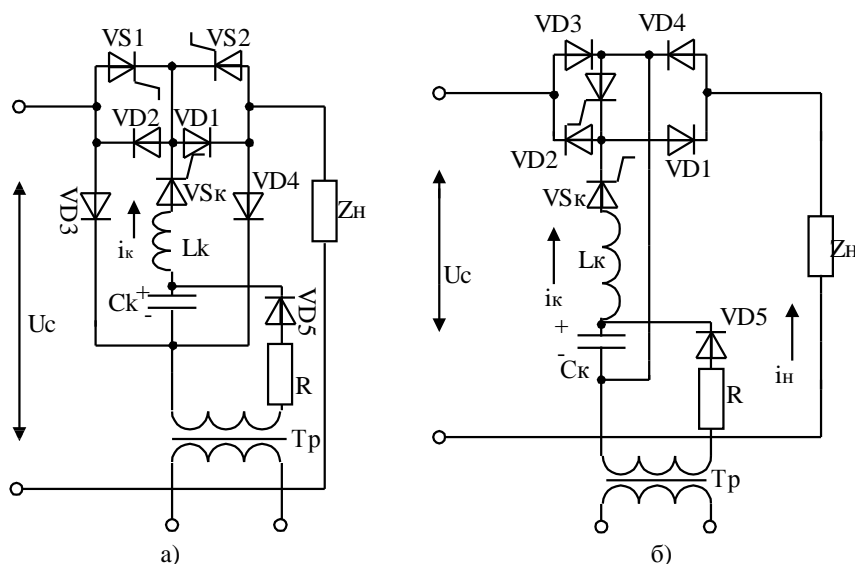


Рис. 16.2. Тиристорные контакторы переменного тока с искусственной коммутацией.

Такие схемы в литературе иногда называют схемами с параллельной коммутацией. Когда ТКИ включен, ток нагрузки протекает в один полупериод через тиристор VS1 и диод VD1, а в другой – через тиристор VS2 и диод VD2. Коммутирующий конденсатор Cк заряжен от маломощного вспомогательного трансформатора Tp с полярностью, указанной на рис. 16.2.а и отделён от основных тиристоров и диодов коммутирующим тиристором VSк.

Для выключения основных тиристоров необходимо подать управляющий импульс на коммутирующий тиристор VSк. При этом, в результате разряда конденсатора Cк, в колебательном контуре возникает ток  $i_k$ , который будет протекать через тот основной тиристор, который в этот момент проводит ток и будет направлен навстречу этому току. Например, допустим, что ток нагрузки проводит тиристор VS1. При включении тиристора VSк через тиристор VS1 начинает протекать разность токов нагрузки  $i_n$  и контура  $i_k$ . Пока ток  $i_k$  меньше тока  $i_n$ , тиристор VS1 будет включен, а диод VD2 – выключен, т.к. к нему приложено обратное напряжение, обусловленное падением напряжения на тиристоре VS1. При равенстве токов  $i_n$  и  $i_k$  тиристор VS1 выключается, ток  $i_k$  продолжает возрастать, разность токов  $i_n$  и  $i_k$  будет протекать через диод VD2. На интервале проводимости диода VD2 к тиристору VS1 будет приложено обратное напряжение, равное падению напряже-

ния на диоде VD2. Когда ток  $i_k$  станет меньше тока  $i_n$ , диод VD2 выключается и ток нагрузки  $i_n$  начинает протекать по контуру диод VD3 – конденсатор  $C_k$  - реактор  $L_k$  – тиристор  $V_{Sk}$  – диод VD1 – нагрузка – источник питания – диод VD3. При этом будет происходить перезаряд конденсатора  $C_k$ . Это обстоятельство вызывает необходимость существенно завышать его установленную ёмкость или вводить в схему дополнительные устройства, поглощающие энергию.

Быстродействие рассмотренного ТКИ при использовании его для коммутации цепей с активной нагрузкой ограничено практически только временем выключения тиристора (десятки микросекунд), однако при активно-индуктивной нагрузке это время увеличивается и зависит от параметров схемы и нагрузки.

Количество основных тиристоров в данном ТКИ может быть уменьшено до одного, как это показано на рис.16.2.б. В этом случае упрощается управление ТКИ, но одновременно увеличиваются потери в схеме. Последнее объясняется тем, что при включенном ТКИ ток нагрузки в каждый момент времени протекает по трем элементам: по двум диодам и одному тиристор, в основном же процессы в обеих схемах схожи.

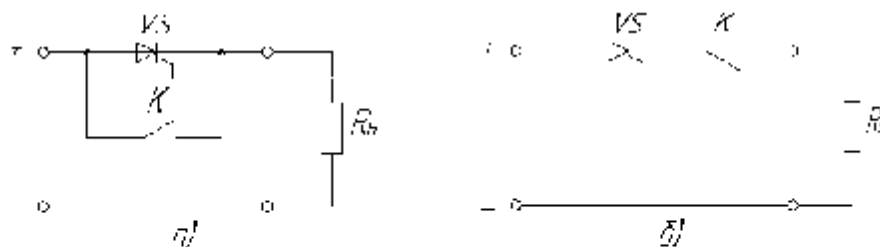
В многофазных системах статические контакторы обычно устанавливают отдельно на каждую фазу, при этом некоторые функциональные узлы фазных контакторов могут быть схемно и конструктивно объединены.

Существует много различных схем полупроводниковых контакторов, отличающихся как принципом действия, так и элементной базой. Большинство из них обладают существенными преимуществами перед электромеханическими аппаратами в части быстродействия, надежности и срока службы, а в некоторых случаях имеют и лучшие массогабаритные показатели. Следует, однако, отметить, что всем полупроводниковым контакторам присущ один общий недостаток – невозможность обеспечения полной гальванической развязки коммутируемых цепей в отключенном состоянии. Это объясняется тем, что сопротивление полностью выключенного полупроводникового прибора всегда имеет конечное значение, в то же время механические контакторы обеспечивают полный разрыв цепи.

## 16.2. Тиристорные контакторы постоянного тока.

Для включения и отключения цепей постоянного тока, так же как и цепей переменного тока, разработано много различных типов полупроводниковых аппаратов, называемых обычно статическими контакторами или переключателями. Поскольку основным элементом таких контакторов, предназначенных для коммутации силовых цепей, является тиристор, то они обычно называются тиристорными контакторами или прерывателями. Одной из особенностей тиристорных контакторов постоянного тока является то, что большинство из них могут широко использоваться для преобразования и регулирования напряжения и тока в качестве основного узла импульсных регуляторов – стабилизаторов, работающих на значительно более высоких частотах переключения, чем тиристорные регуляторы – стабилизаторы в цепях переменного тока. В этой связи, быстродействие тиристорных коммутаторов постоянного тока является важнейшим фактором, определяющим в значительной мере области их применения.

Однако, в некоторых случаях основным требованием к тиристорному контактору является обеспечение минимального времени его вступления в работу, например в некоторых типах установок гарантийного питания. Для этой цели могут быть использованы комбинированные схемы контактора, состоящего из тиристора и электромагнитного контактора обычного типа, изображенного на рисунке 16.3.



*Рис 16.3 Комбинированные контакторы постоянного тока  
 а) схема с параллельным включением подвижного  
 контактора;  
 б) схема с последовательным включением подвижного  
 контактора.*

Необходимость введения электромагнитного контактора в этих схемах обусловлена тем, что необходимо обеспечить выключение тиристора. В схеме на рисунке 16.3.а выключение тиристора обеспечивается шунтированием его замыкающим контактом К, а в схеме на рисунке 16.3.б. размыканием размыкающего контакта К.

Включение комбинированного контактора осуществляется подачей управляющего импульса на тиристор VS. Следовательно, время включения комбинированного контактора, с момента поступления команды, будет определяться временем включения тиристора, а время выключения – временем включения электромагнитного контактора.

У большинства типов тиристорных контакторов постоянного тока предусматривается искусственная коммутация тиристорных, для реализации которой разработано много различных схем. В курсе “Автономные преобразователи” будут рассмотрены основные способы искусственной коммутации тиристорных в автономных инверторах. При классификации схем тиристорных контакторов по способу коммутации тиристорных, обычно выделяют такой признак, как связь включения и выключения основного тиристора контактора общим электромагнитным процессом в коммутирующем контуре. В этом смысле различают контакторы однооперационные (или с одноступенчатой коммутацией), двухоперационные и трехоперационные (или с двухступенчатой коммутацией). Эти же способы лежат и основе схем, обеспечивающих искусственную коммутацию тиристорных в статических контакторах.

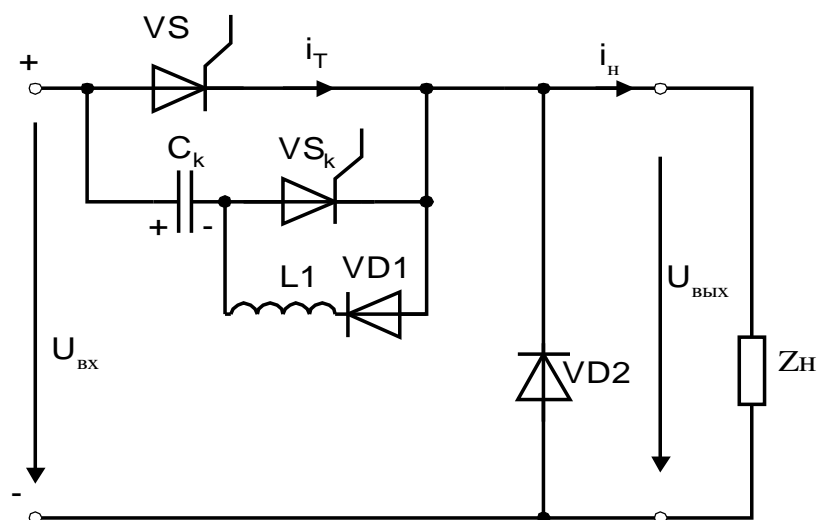
В однооперационных контакторах включение и выключение основного тиристора неразрывно связаны общим электромагнитным процессом в коммутируемом контуре. В контакторах этого типа подача управляющего импульса на основной тиристор вызывает его включение, а выключение происходит вследствие колебательного характера тока, протекающего через тиристор. Следовательно, включение и выключение тиристора в таких схемах происходят в течение одной ступени работы контактора, и управлять моментом выключения тиристора независимо от момента его включения нельзя.

В контакторах с двухступенчатой коммутацией выключение основного тиристора можно производить практически независимо от момента его включения. В таких схемах выключение основного тиристора производится посредством подключения коммутирующей цепи, к основному тиристорному, через вспомогательный (коммутирующий) тиристор. Поэтому выключение контакторов в таких схемах можно рассматривать как вторую, независимую рабочую операцию, которая осуществляется подачей управляющего импульса на коммутирующий тиристор. Поэтому схемы подобного типа называются двухоперационными. Если подготовка коммутирующего контура к выключению основного тиристора связана с дополнительной операцией, например с перезарядом коммутирующей цепи посредством включения тиристора перезаряда (т.е. введением третьей операции – подачей

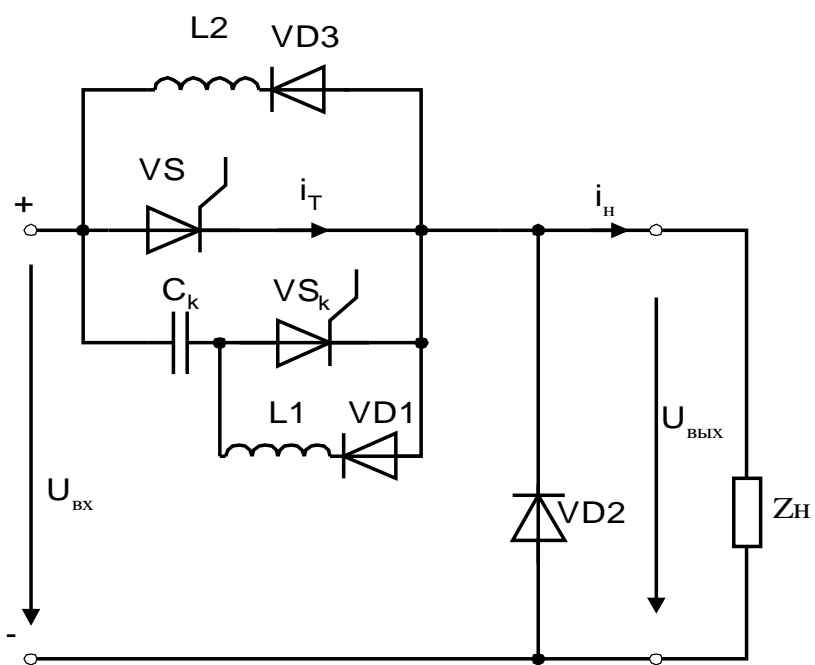
управляющего импульса на тиристор перезаряда), то такие схемы принято называть трех-операционными. Теоретически работа контактора может быть связана с еще большим количеством операций подобного типа, но такие схемы не получили практического применения.

Иногда при классификации схем тиристорных контакторов используются и другие менее существенные признаки, например элементный состав коммутирующей цепи (емкостной или индуктивно – емкостной), способ включения коммутирующей цепи (параллельно основному тиристорному или нагрузке и др.), наличие трансформатора, разделяющего цепи основного тиристора и коммутирующие, количество цепей содержащих основные тиристоры (с одной цепью – однофазные, с двумя – двухфазные и т.д. ).

Наибольшее распространение получили схемы тиристорных контакторов с двух-ступенчатой коммутацией, которые можно рассматривать как аналоги полностью управляемых ключевых элементов используемых для коммутации электроцепей. На рис.16.4. а) представлена схема простейшего контактора подобного типа с конденсаторной коммутацией, осуществляется подключением коммутирующего конденсатора  $C_k$  параллельно основному тиристорному VS.



a)



b)

Рис.16.4.

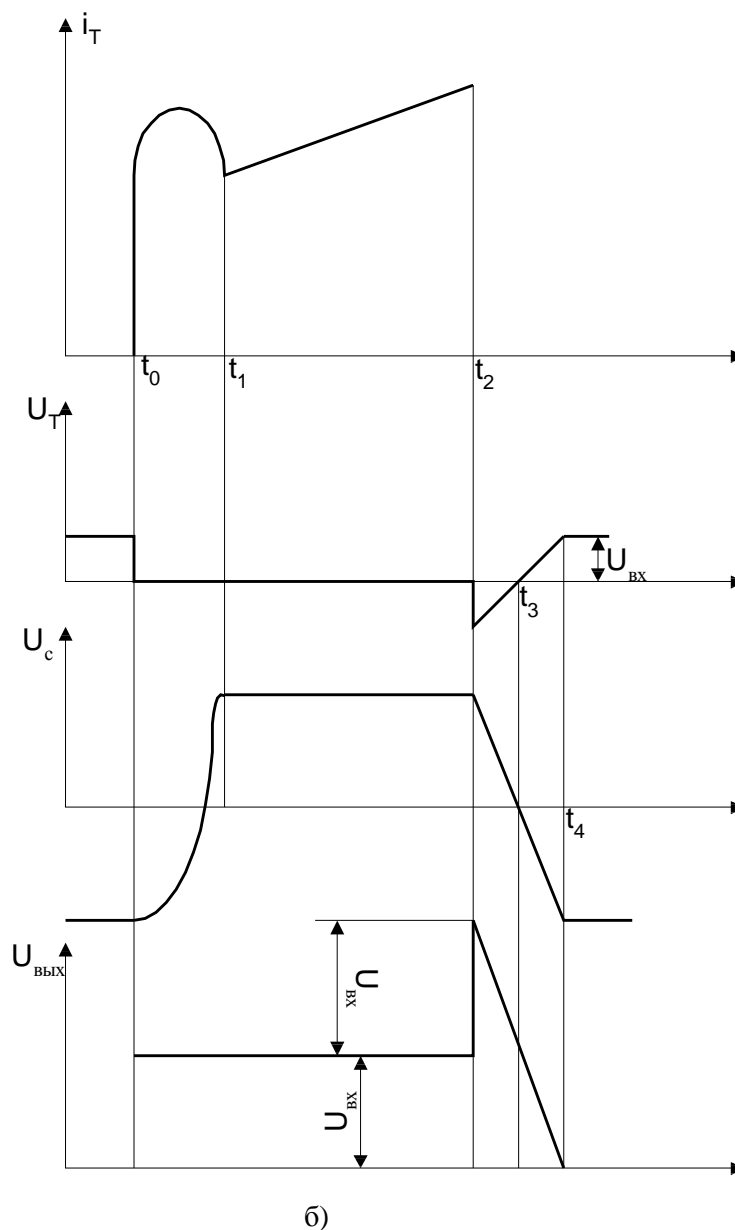


Рис.16.4. Тиристорный контактор с конденсаторной коммутацией:

- а) принципиальная схема;
- б) диаграмма токов и напряжений на элементах схемы с дополнительным контуром перезаряда;
- в) схема с дополнительным контуром перезаряда.

В данной схеме нагрузка предполагается активно-индуктивной. Поэтому в схеме для протекания тока, обусловленного энергией накопленной в индуктивной составляющей нагрузки на интервале выключенного состояния контактора, предусмотрен обратно включенный диод VD2.

Предположим, что конденсатор  $C_k$  заряжен с полярностью напряжения указанной на рис.16.4 а. При подаче в момент времени  $t_0$  управляемого импульса на тиристор VS он включается, и на нагрузку подается входное напряжение  $U_{вх}$ . Одновременно начинается колебательный процесс перезаряда конденсатора по контуру  $C_k - VS - VD1 - L1$ . Процесс



перезаряда заканчивается в момент  $t_1$ , когда ток конденсатора достигает нулевого значения. Диод VD1 блокирует дальнейшее протекание процесса перезаряда и в результате на конденсаторе будет напряжение с полярностью, противоположной указанной на рис.16.4а. Таким образом, коммутирующий конденсатор оказывается подготовленным к выключению основного тиристора VS.

Для выключения основного тиристора на коммутирующий тиристор  $VS_K$  в момент времени  $t_2$  подается управляющий импульс. Включение тиристора  $VS_K$  приводит к выключению тиристора VS, т.к. к нему оказывается подключенным заряженный конденсатор  $C_K$ , разрядный ток которого направлен противоположно току нагрузки  $i_n$ , протекающего через тиристор VS. После выключения тиристора VS ток начинает протекать через тиристор  $VS_K$  и конденсатор  $C_K$ , перезаряжая его. До тех пор пока напряжение на конденсаторе не изменит свой знак (момент  $t_3$ ) к основному тиристорному будет приложено обратное напряжение, и он имеет возможность выключиться.

Процессы, протекающие на интервале перезаряда конденсатора более скоротечны, чем процессы в нагрузке. Можно считать, что ток  $i_n$  за это время существенно не изменится, поэтому процесс изменения напряжения на конденсаторе  $C_K$  в процессе перезаряда происходит практически по линейному закону.

В момент времени  $t_4$  напряжение на конденсаторе  $C_K$  достигает значения равное  $U_{вх}$  и процесс перезаряда прекращается. Это объясняется тем, что при дальнейшем повышении напряжения происходит включение обратного диода, к которому приложена разность напряжений  $U_{вх}$  и конденсатора  $U_c$ . В результате  $I_n$  начинает протекать через диод.

Емкость коммутирующего конденсатора  $C_K$  в данной схеме определяется коммутируемым током нагрузки и входным напряжением. Учитывая, что процесс перезаряда конденсатора на интервале выключения тиристора происходит по линейному закону, можно определить емкость конденсатора  $C_K$  по формуле:

$$C_K \geq \frac{I_{n.\max} \cdot t_q}{U_{вх}},$$

где  $I_{n.\max}$  – максимальное значение тока нагрузки в момент выключения тиристора VS,

$t_q$  – время выключения тиристора VS.

Основными недостатками рассмотренной схемы является увеличение длительности коммутационного процесса при выключении в режимах малых нагрузок. Это обусловлено тем, что длительность перезаряда увеличивается с уменьшением тока перезаряда, т.е.  $i_n$ . Другим недостатком является дополнительная загрузка основного транзистора по току в период подготовки  $C_K$  к коммутации, когда происходит его перезаряд, вызванный включением тиристора  $VS_K$ . Кроме того, в момент выключения тиристора VS на нагрузке возникает всплеск напряжения приблизительно двух кратной величины относительно значения  $U_{вх}$ .

Зависимость длительности коммутационного процесса от тока нагрузки можно существенно уменьшить, если в схему ввести дополнительный контур перезаряда коммутирующего конденсатора, состоящий из диода VD2 и реактора L2 (рис.16.4.в). Наличие дополнительного контура приводит к тому, что в момент включения коммутирующего тиристора  $VS_K$  конденсатор  $C_K$  будет перезаряжаться не только током нагрузки  $i_n$ , но и током в колебательном контуре  $C_K$ - $VS_K$ -VD2-L2, при этом длительность перезаряда конденсатора не может быть больше половины периода колебательного процесса в этом контуре при любых токах нагрузки, включая холостой ход.

Всплески напряжения на нагрузке не всегда могут быть допустимы. На рис.16.5.а приведена схема, свободная от этого недостатка.

