

СХЕМА ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИИ С ДРОССЕЛЬНЫМ ЗАРЯДОМ КОММУТИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТИ

А. И. ЗАЙЦЕВ, Б. А. ЛАПИН

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Для выключения тиристоров, работающих в цепях постоянного тока, наибольшее распространение получили схемы конденсаторной коммутации. Условием эффективной работы таких схем в широком диапазоне изменения нагрузок на тиристорный преобразователь является независимость интервала времени, представляемого тиристором для восстановления управляющих свойств, от тока нагрузки. В схемах с емкостным отключением для выполнения этого условия необходимо, чтобы величина коммутирующего импульса увеличивалась при возрастании тока нагрузки (см. рис. 4). С этой целью в импульсном модуляторе, приведенном на рис. 1, последовательно с нагрузкой включен дроссель D_p , служащий для отбора мощности из цепи нагрузки в схему коммутации.

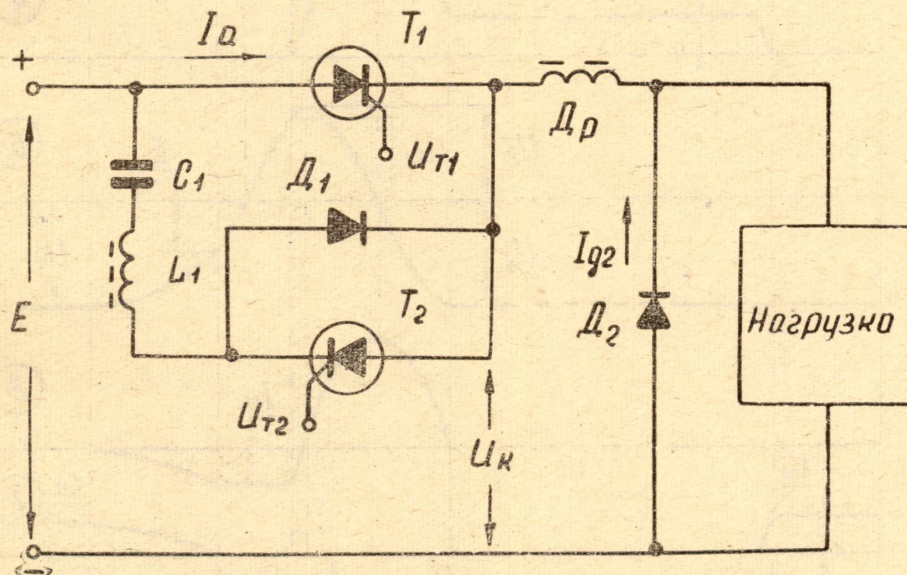


Рис. 1

Особенностью работы такой схемы является то, что минимальное напряжение на емкости, соответствующее малым нагрузкам, равно напряжению источника питания. При увеличении нагрузки к этому напряжению прибавляется вольтодобавка, пропорциональная току нагрузки. Следует отметить, что эта вольтодобавка прибавляется к напряжению конденсатора с запаздыванием в пределах одного периода коммутации. Поэтому такую схему отключения можно использовать при работе тиристорного преобразователя на нагрузку индуктивного характера, в которой ток достигает установившегося значения за несколько периодов коммутации.

Возможной областью применения тиристорных преобразователей с этой схемой коммутации является регулирование возбуждения электрических машин, управление приводами электрокаров, тяговыми двигателями электровозов, в регулируемых инверторах и др.

Процесс коммутации в схеме рис. 1 может быть разбит на четыре этапа. В течение первого этапа, который начинается после включения тиристора T_2 , происходит резонансный перезаряд коммутирующей емкости по цепи $C_1 T_1 T_2 L_1$ (интервал $t_2 - t_3$ на рис. 2).

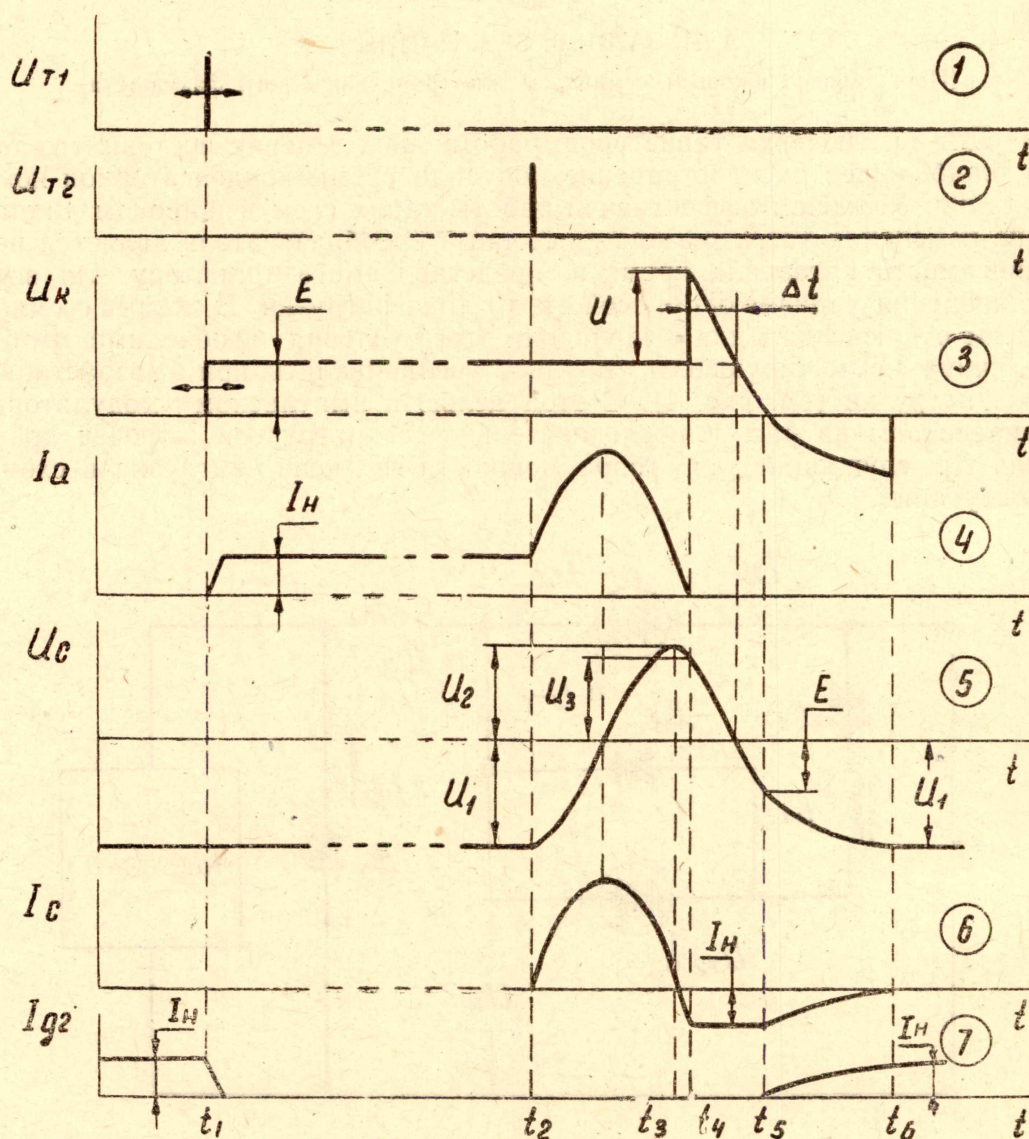


Рис. 2

Второй этап характеризуется увеличением тока в цепи $L_1 C_1$ в обратном направлении (через D_1) от 0 до I_n (интервал t_3-t_4). На такую же величину соответственно уменьшается анодный ток I_a тиристора T_1 . При $I_a=0$ тиристор закрывается и под действием напряжения U_c смещается в обратном направлении (рис. 2, граф. 3).

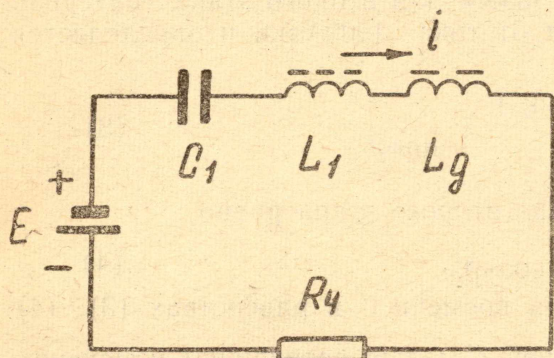


Рис. 3

Время, предоставляемое тиристорам T_1 для восстановления управляющих свойств, отмечено на граф. 3 через Δt .

Четвертый этап работы схемы (t_5-t_6) начинается тогда, когда конденсатор C_1 зарядится в первоначальном направлении до напряжения источника питания E . С этого момента происходит уменьшение тока в цепи $C_1 L_1 D_1 L_{др}$ от $i=I_n$ до 0, сопровождающееся соответствующим увеличением тока через шунтирующий диод D_2 , который служит для создания режима непрерывного тока в нагрузке. В течение этого этапа происходит переход всей энергии, запасенной индуктивностями L_1 и $L_{др}$, в коммутирующую емкость. Конечное напряжение, до которого заряжается емкость к концу четвертого этапа, является начальным напряжением для первого этапа следующего цикла коммутации.

Это напряжение можно найти с помощью схемы замещения для четвертого этапа коммутации, которую можно составить на основании схемы рис. 1, учитывая, что с момента t_5 напряжение на диоде D_2 становится равным нулю (рис. 3).

Решив дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{r_4}{(L_1 + L_{др})} \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{(L_1 + L_{др})C_1} U_c = \frac{1}{(L_1 + L_{др})C_1} E,$$

описывающее схему рис. 3, при начальных условиях $U_c(0)=E$, $i(0)=I_n$, можно найти амплитудное напряжение на конденсаторе:

$$U_1 = E + k_4 I_n \sqrt{\frac{L_1 + L_{др}}{C_1}}, \quad (1)$$

$$\text{где } k_4 = e^{-\frac{b_4 T_4}{4}}$$

b_4 , T_4 — коэффициент затухания и период собственных колебаний контура на рис. 3.

Напряжение U_1 является начальным при резонансном перезаряде конденсатора на первом этапе следующего цикла коммутации. За счет потерь в контуре $L_1 C_1$ после перезаряда емкости оно уменьшится до величины, равной

$$U_2 = k_1 \left(E + k_4 I_n \sqrt{\frac{L_1 + L_{др}}{C_1}} \right), \quad (2)$$

В течение интервала времени t_4-t_5 , соответствующего третьему этапу работы схемы, емкость C_1 разряжается через нагрузку. По условию нагрузка имеет индуктивный характер, поэтому в течение промежутка времени t_4-t_5 ток через конденсатор можно считать неизменным по величине и принять линейный закон изменения напряжения U_c .

$$\text{где } k_1 = e^{-\frac{b_1 T_1}{2}}$$

$b_1 T_1$ — коэффициент затухания и период собственных колебаний контура $C_1 L_1$.

Это напряжение является начальным для второго этапа (интервал t_3-t_4). Его длительность t' зависит от тока нагрузки и определяется следующим уравнением:

$$I_n = U_2 \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot e^{-b_2 t'} \cdot \sin \omega_1 t'. \quad (3)$$

Напряжение на конденсаторе в конце второго этапа равно

$$U_3 = U_2 e^{-b_2 t'} \cos \omega_1 t'. \quad (4)$$

Возможный диапазон изменения времени t' в равенствах (3), (4) равен $\frac{T_1}{4}$. Учитывая, что для цепей с малым затуханием изменение

величины $e^{-b_2 t'}$ в промежутке времени от $t'=0$ до $t'=\frac{T_1}{4}$ незначительно, множитель $e^{-b_2 t'}$ в выражениях (3) и (4) можно считать постоянным и равным $k_2 = e^{-b_2 t'}$.

Тогда из уравнений (3) и (4) можно найти напряжение на конденсаторе в конце второго этапа:

$$U_3 = k_2 U_2 \sqrt{1 - \frac{1}{(k_2)^2} \left(\frac{I_n}{U_2} \right)^2 \frac{L_1}{C_1}}. \quad (5)$$

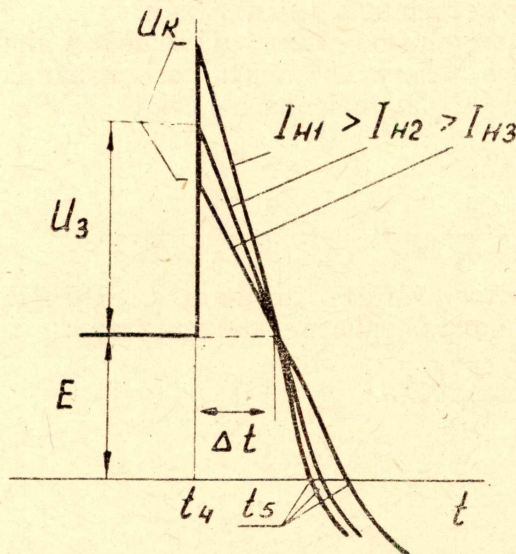


Рис. 4

Третий этап работы схемы коммутации характеризуется смещением тиристора в обратном направлении и линейным разрядом коммутирующей емкости. Форма напряжения на катоде тиристора T_1 приведена на рис. 4. Как следует из этого рисунка, продолжительность смещения тиристора в обратном направлении Δt равна:

$$\Delta t = \frac{U_3}{I_n} \cdot C_1 \quad (6)$$

Подставляя в (6) значение U_3 из (5) и (2), получим:

$$\Delta t = \sqrt{\left[\left(k_1 k_2 \frac{E}{I_n} \right)^2 C_1^2 + 2 k_4 (k_1 k_2)^2 \frac{E}{I_n} \sqrt{\frac{L_1 + L_{\text{дп}}}{C_1}} C_1^2 \right] + \rightarrow} \\ \rightarrow + \frac{[k_1 k_2 k_4]^2 (L_1 + L_{\text{дп}}) C_1 - L_1 C_1}{\quad} \quad (7)$$

Как следует из выражения (7), при увеличении тока нагрузки время Δt , предоставляемое тиристорам для восстановления управляющих свойств, стремится к постоянной величине:

$$\Delta t_c = \lim_{I_n \rightarrow \infty} \Delta t = \sqrt{(k_1 k_2 k_4)^2 (L_1 + L_{др}) C_1 - L_1 C_1} \quad (8)$$

При выполнении условия $\Delta t_c > t_{\text{восст.}}$ схема коммутации с дроссельным зарядом коммутирующей емкости будет обеспечивать отключение тиристора T_1 при любом токе нагрузки.

Следует отметить, что при расчете схемы по условию $\Delta t_c > t_{\text{восст.}}$ в случае большой величины $t_{\text{восст.}}$ конденсатор будет заряжаться до больших напряжений, что не всегда приемлемо. В этом случае определение параметров схемы $L_1 C_1 L_{др}$ можно произвести, задавшись величиной напряжения и тока в уравнение (1) и величиной Δt в выражении (7). В качестве третьего условия можно взять период собственных колебаний контура $L_1 C_1$:

$$T_1 \cong 2\pi \sqrt{C_1 L_1}$$

Для иллюстрации качества работы описанной схемы искусственной коммутации на рис. 5 приведены расчетная и экспериментальная зависимости $\Delta t = f(I_n)$. По кривым видно, что при возрастании тока на-

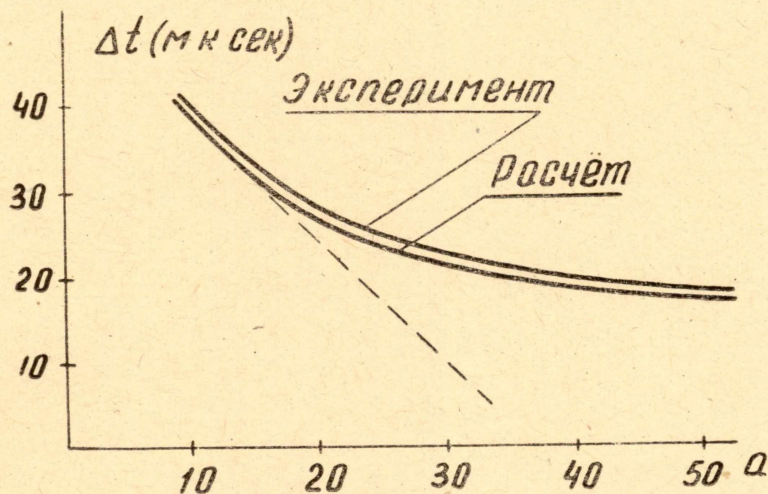


Рис. 5.

грузки величина Δt уменьшается очень медленно. Гораздо быстрее уменьшается величина этого интервала в обычной схеме коммутации с той же величиной коммутирующей емкости (пунктирная кривая).

Применение дроссельного заряда позволяет значительно уменьшить величину коммутирующего конденсатора. Благодаря этому уменьшается нижний порог регулирования напряжения на нагрузке, что в конечном счете увеличивает диапазон регулирования.

Выводы

1. В схеме искусственной коммутации с дроссельным зарядом коммутирующего конденсатора повышается надежность отключения за счет автоматической стабилизации в функции тока нагрузки интервала времени, предоставляемого тиристорам для восстановления управляющих свойств.

2. Дроссельный заряд коммутирующего конденсатора позволяет значительно уменьшить величину его емкости и увеличить за счет этого диапазон регулирования тиристорного преобразователя.

3. Применение дроссельного заряда коммутирующей емкости принципиально позволяет создавать схемы коммутации, способные отключать силовой тиристор при любом токе нагрузки.

4. Экспериментальное сравнение различных схем искусственной коммутации показало, что разработанная схема по надежности коммутации и перегрузочной способности превосходит схемы, описанные в литературе.