

## ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Н.М. Сапрунова  
г. Челябинск, ЮУрГУ

**Определены условия работы тиристоров для первого периода работы в схеме тиристорного преобразователя постоянного напряжения.**

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения, выполненные на тиристорах, применяются для электроэрозионной обработки материалов [1]. Исследование вольт-временных характеристик эрозионного промежутка приведено в работах Лившица А.Л. и др. авторов [2]. В них показано, что в первом приближении эрозионный промежуток можно представить противо-ЭДС  $E_э$ , если длительность импульса тока через него больше, чем  $3\tau$ , где  $\tau$  - постоянная времени эрозионного промежутка.

Схема исследуемого генератора импульсов приведена на рис. 1, где  $VS_1$  - рабочий тиристор;  $VS_2$  - коммутирующий тиристор;  $R_n$  - токоограничивающее сопротивление;  $E_э$  - противо-ЭДС нагрузки;  $R_{ш}$  - шунтирующее сопротивление, замыкающее контур тока при отсутствии электрического разряда в промежутке.

В задачу исследования входит определение следующих показателей работы генератора импульсов: 1) времени, предоставляемого на восстановление управляемости тиристоров  $VS_1$  и  $VS_2$ ; 2) максимального напряжения на конденсаторе  $C$ , тиристорах и диоде  $VD$ .

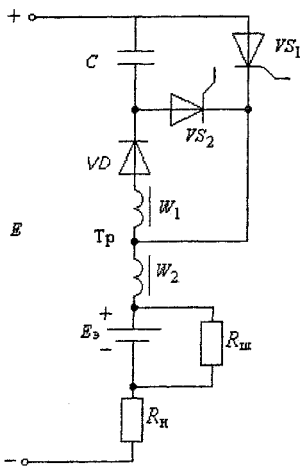


Рис. 1. Схема тиристорного генератора импульсов

При анализе схемы приняты следующие допущения: 1) тиристоры - идеальные ключи; 2) индуктивность намагничивания  $L_m$  трансформатора постоянная, а индуктивностью рассеяния можно пренебречь; 3) схема питается от источника ЭДС.

Допустим, что в первый период работы генератора не произошло разряда в эрозионном промежутке и нагрузка носит активный характер. Период работы разбит на несколько участков (рис. 2).

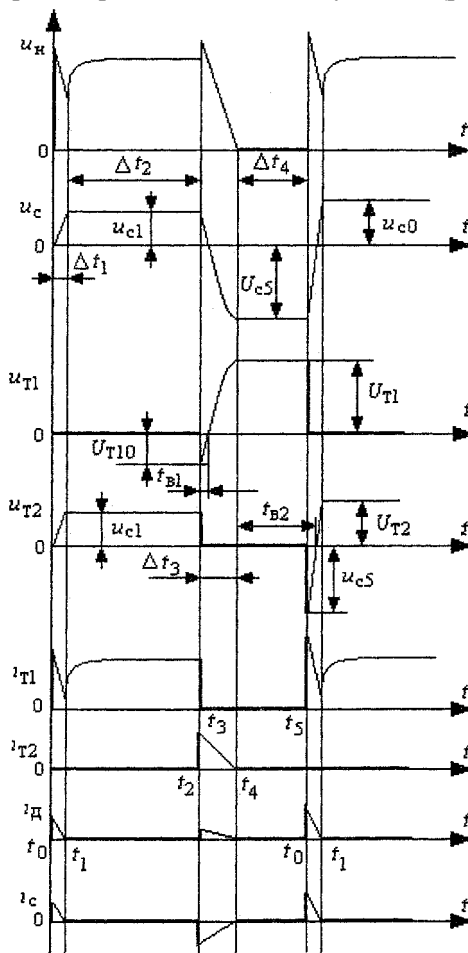


Рис. 2. Временные диаграммы работы

Соответственно принятым допущениям схема замещения для первого участка работы при включении тиристора  $VS_1$  приведена на рис. 3, где  $R_n$  - сопротивление диода и соединительных проводов. Контур диода и конденсатора для интервала времени  $\Delta t_1$  приведен к первичной обмотке трансформатора через коэффициент трансформации

$$k = w_1/w_2 : C' = c/k^2, R'_d = R_d \cdot k^2, i'_2 = i_2/k, u'_c = u_c \cdot k. \tag{1}$$

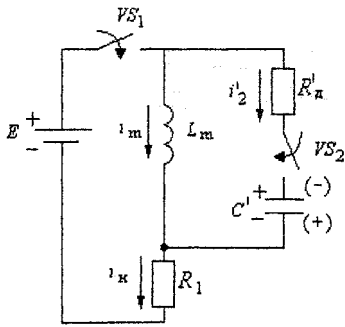


Рис. 3. Схема замещения для первого участка работы

На первом участке работы  $\Delta t_1$  конденсатор заряжается до некоторого начального напряжения  $U_{c1}$ , полярность которого обозначена на рис. 3 без скобок. Наличие в схеме индуктивности и емкости создает условия для протекания либо апериодического, либо колебательного процессов. В дальнейшем индексам «а» обозначаются величины для апериодического процесса, индексом «к» - для колебательного.

На основании решения операторных уравнений для первого участка работы находится ток:

$$I'_2 = \frac{p^2 \cdot E(p)}{R \cdot (p^2 + a' \cdot p + d')}, \quad (2)$$

где  $R = R'_d + R_n + R_m$ ,  $R_1 = R_n + R_m$ ,

$$a' = \frac{c' \cdot R'_d \cdot R_n + L_m}{L_m \cdot c' \cdot R}, \quad d' = \frac{R_n}{L_m \cdot c' \cdot R}. \quad (3)$$

Заряд конденсатора заканчивается в момент прохождения через ноль зарядного тока емкости. Напряжение на обкладках конденсатора  $U_c(t)$  нарастает от нуля до значения, определяемого временем заряда, и блокируется диодом VD. Из условия  $i'_2(t) = 0$  находятся времена заряда конденсатора  $\Delta t_{1a}$  и  $\Delta t_{1k}$ :

$$\Delta t_{1a} = \frac{1}{b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{4(a')^2 - 4(b')^2}}, \quad (4)$$

$$\Delta t_{1k} = \frac{1}{\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{4(\omega')^2 + 4(a')^2}}, \quad (5)$$

$$\text{где } b' = \sqrt{\frac{(a')^2}{4} - d'}, \quad \omega' = \sqrt{d' - \frac{(a')^2}{4}}. \quad (6)$$

Значения  $\Delta t_{1a}$  и  $\Delta t_{1k}$  позволяют определить напряжение на конденсаторе в конце первого участка:

$$\frac{U_{c1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \times \exp \left[ -\frac{a'}{2b'} \arcsin \frac{2b'}{\sqrt{(a')^2 - 4(b')^2}} \right], \quad (7)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{2}{kc'R\sqrt{(\omega')^2 - 4(a')^2}} \times \exp \left[ -\frac{a'}{2\omega'} \arcsin \frac{2\omega'}{\sqrt{(a')^2 + 4(\omega')^2}} \right] \quad (8)$$

Искомые величины времени заряда и напряжения на конденсаторе удобно выразить в относительных единицах, причем, в первом приближении считать  $R_n > R'_d$ . Постоянные времени и время восстановления рассматриваются относительно периода следования импульсов T:

$$\frac{L_m}{R_n T} = \tau_0, \quad \frac{CR_n}{T} = \tau_3, \quad \frac{L_m}{R'_d T} = \tau_p, \quad \frac{t_g}{T} = \tau_g. \quad (9)$$

Время заряда и начальное напряжение на конденсаторе определяются из выражений:

$$\frac{\Delta t_{1a}}{T\tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}}, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta t_{1k}}{T\tau_3} = \frac{2}{k^2 \sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1}, \quad (11)$$

$$\frac{U_{ca1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[ -\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{A}} \right], \quad (12)$$

$$\frac{U_{ck1}}{E} = \frac{A}{k} \exp \left[ -\frac{1}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{4}{A} - 1} \right], \quad (13)$$

где  $A = \frac{k^2 \tau_0}{\tau_3}$ .

С момента времени  $t_1$  начинается второй участок работы. В схеме рис. 3 остаются два элемента: индуктивность  $L_m$  и нагрузка  $R_n$ , процессы в которых определяются постоянной времени  $\tau_n = L_m/R_n$  и начальным значением тока намагничивания. Значение тока нагрузки находится из выражения:

$$i_n(t) = \frac{E}{R_n} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_n} \right) \right] + i_m(t_1) \cdot \exp \left( -\frac{t}{\tau_n} \right). \quad (14)$$

При условии, что длительность импульса тока нагрузки подчиняется неравенству  $t_n > \tau_n$ , в нагрузке устанавливается значение тока  $I_0 = E/R_n$ .

В момент времени  $t_2$  происходит включение тиристора  $VS_2$ . Напряжение на конденсаторе не изменилось:  $U_{c2} = U_{c1}$ . Начинается третий участок работы. Схема замещения для него приведена на рис. 4. Начинается выключение тиристора  $VS_1$ , сопровождаемое протеканием обратного тока в контуре  $C-VS_2-VS_1$ . Зная уменьшение напряжения  $U_{c2}$  на конденсаторе за счет протекания обратного

тока тиристора, можно определить напряжение конденсатора после выключения тиристора  $VS_1$ . Изменение напряжения определяется по изменению заряда на обкладках конденсатора.

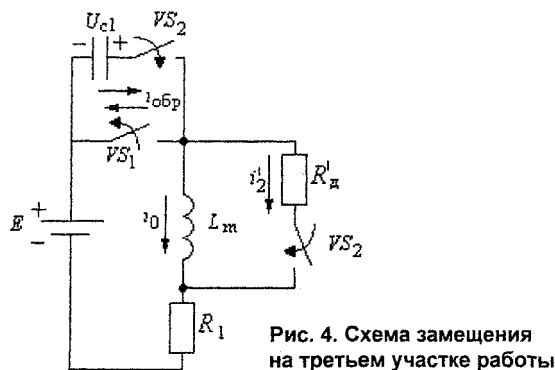


Рис. 4. Схема замещения на третьем участке работы

При протекании прямого тока в слое p и p тиристора накапливается некоторый заряд  $Q_{np}$ . Величина накопленного заряда является функцией прямого тока, и скорости изменения прямого тока в момент времени перед коммутацией. Заряд восстановления тиристора  $Q_в$  определяется по методике, приведенной в [3].

Вычисляется ампер-секундный интеграл за последние 6 мкс проводимости прямого тока:

$$Q_{np} = I_a \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ас} \quad \text{По зависимости}$$

$$\left| \frac{Q_в}{Q_{np}} \right| \% = f \left( \frac{di}{dt} \right) \quad \text{определяется } \left| \frac{Q_в}{Q_{np}} \right| \%. \quad \text{При-}$$

чем, при  $\frac{di}{dt} > 100 \text{ А/мкс}$  кривая относительного значения обратного заряда стремится к двукратному насыщению. Изменение напряжения на конденсаторе равно  $\Delta U_c = Q_в / C$ . Расчеты, проведенные для значений  $I_a = (10 \dots 200) \text{ А}$  и соответствующих им значений коммутирующих емкостей, показали, что изменение напряжения на конденсаторе невелико по сравнению с начальным значением:  $8\% U_{c0} > \Delta U_c > 0,5\% U_{c0}$ . Это позволяет принять значение напряжения на конденсаторе в момент времени  $t_3$  таким же, как для момента времени  $t_2$ .

С момента  $t_3$  начинается четвертый участок работы – процесс перезаряда конденсатора. Схема замещения приведена на рис. 5.

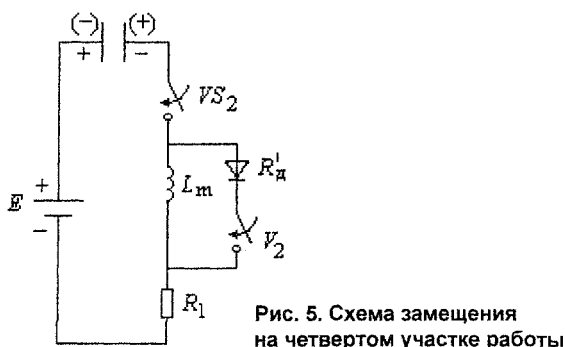


Рис. 5. Схема замещения на четвертом участке работы

Для нее найдены значения напряжений на конденсаторе  $U_{ca}(t)$  и  $U_{ck}(t)$ .

Промежуток времени, в течение которого напряжение на конденсаторе уменьшается от начального начального значения до нуля, определяет время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристора  $VS_1$ .

$$\frac{t_{ca}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{4}{B}}} \arcsin \left[ \sqrt{1-\frac{4}{B}} \times \sqrt{1 + \frac{U_{cl}}{E} \left( 2 + \frac{U_{cl}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B} - 1} \right] \times \frac{4}{B \left( 1 + \frac{U_{cl}}{E} \right)}, \quad (15)$$

$$\frac{t_{ck}}{T\tau_3} = \frac{2}{\sqrt{\frac{4}{B}-1}} \arcsin \left[ \sqrt{\frac{4}{B}-1} \times \sqrt{1 + \frac{U_{cl}}{E} \left( 2 + \frac{U_{cl}}{E} \right) \cdot \frac{4}{B} - 1} \right] \times \frac{4}{B \left( 1 + \frac{U_{cl}}{E} \right)}, \quad (16)$$

В случае колебательного процесса перезаряда конденсатора на интервале времени  $\Delta t_3$  величина напряжения на нем превышает  $E$ . Тогда после прекращения тока через тиристор  $VS_2$  конденсатор разряжается по цепи  $E-R_n-Tr-VS_3$ , пока напряжение на нем не достигнет значения  $E$ . Начальное напряжение конденсатора  $U_{c0}$  для следующего периода работы равно  $E$ , так как в токе нагрузки должна быть пауза. Для работы на эрозионный промежуток желательно иметь аperiodический процесс при работе  $VS_2$ , чтобы отсутствовало обратное напряжение на эрозионном промежутке.

Наибольшее обратное напряжение  $U_{т10}$  к тиристору  $VS_1$  прикладывается в момент  $t_2$ , следовательно, оно равно  $U_{c1}$ . Наибольшее прямое напряжение  $U_{т1}$ , равное  $E$ , прикладывается при аperiodическом процессе с момента  $t_4$  до начала второго периода работы, в колебательном процессе напряжение  $U_{т1к}$  – в момент времени  $t_{m3}$ :

$$\frac{U_{т1к}}{E} = \left( 1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \right] \times \left( \cos \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} + \frac{1}{\sqrt{4B-1}} \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T} \right) - \frac{U_{c0}}{E} + \frac{2}{\sqrt{4B-1}} \cdot \left( 1 + \frac{U_{c0}}{E} \right) \times \exp \left( -\frac{t_{m3}}{2\tau_3 T} \right) \cdot \sin \frac{t_{m3} \sqrt{4B-1}}{2\tau_3 T}, \quad (17)$$

$$\omega t_{m3} = \arcsin \left[ 1 + \frac{a(E+U_{c0}+i_{m3}R\delta) - a^2(E+U_{c0}) - (E+U_{c0})}{2\omega cR} - \frac{a^2(E+U_{c0}) - (E+U_{c0})}{4\omega^2} \right] + \frac{\frac{a}{2}(E+U_{c0}) - \frac{a}{2\omega}(E+U_{c0}) + \frac{E+U_{c0}-i_{m3}R\delta}{\omega cR}}{2\omega cR}, \quad (18)$$

где  $a = \frac{L_m + RR'C}{CL_m R}$ ,  $d = \frac{R'_0}{CL_m R}$ ,  $\omega = \sqrt{d - \frac{a^2}{4}}$ ,

$$B = \frac{k^2 \tau_3}{\tau_p}, \quad (19)$$

$$i_{m3} = \left( \frac{E+U_{c0}}{R} \cdot \frac{R'_\delta}{L_m} + \frac{2I_0 L_m d}{R} \right) \cdot \frac{\sin \omega t}{\omega} \cdot \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) + \frac{2(E+U_{c0}+I_0 L_m a) - I_0 R'_\delta}{R} \left( \cos \omega t - \frac{a}{2\omega} \sin \omega t \right) \times \exp\left(-\frac{a}{2}t\right). \quad (20)$$

Наименьшее прямое напряжение, равное  $U_{c1}$  прикладывается к тиристор  $VS_2$  после заряда конденсатора. С точки зрения времени, представляемого на восстановление управляемости, тиристор  $VS_2$  находится в лучших условиях, чем тиристор  $VS_1$ . В течение интервала времени  $\Delta t_4$  напряжение анод-катод тиристора  $VS_2$  равно нулю, а после начала второго периода становится отрицательным. Наибольшее значение обратного напряжения оп-

ределено в конце интервала  $\Delta t_3$ :  $U_{T2D} = U_{C5}$ .

Зажигание дугового разряда на эрозионном промежутке происходит в начале одного из периодов работы, в том числе, может произойти в первом периоде. Тогда в схемах рис. 1, 3, 4, 5 действует разность ЭДС ( $E-E_3$ ) и выражения, полученные для активной нагрузки, справедливы для нагрузки в виде противо-ЭДС.

#### Выводы

1. Условия работы тиристора  $VS_1$  тяжелее, чем тиристора  $VS_2$ .

2. Время, предоставляемое на восстановление запирающих свойств тиристора  $VS_1$  необходимо определять для первого периода работы, связанного с первоначальным включением  $VS_1$ .

#### Литература

1. Бронштейн, Л.И. Исследование и разработка источников питания для электроэрозионных станков на базе тиристорных прерывателей постоянного тока: дис. ... к.т.н. / Л.И. Бронштейн. - Львов, 1974. - 35 с.
2. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Л. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Соценко. — М.: Машиностроение, 1967. - 295 с.
3. Кремниевые управляемые вентили-тиристоры. Технический справочник / под ред. В.А. Лабунцова. - М : Энергия, 1964. - 360 с.

Сапрунова Надежда Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ, окончила ЧПИ в 1962 г. по специальности «Автоматика и телемеханика».