

## КОММУТАТОР ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

С.В. Пустынников

Томский политехнический университет

E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Проанализирована работа тиристорного коммутатора для размыкания цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой. Получены расчетные соотношения для напряжения заряда рабочих конденсаторов и времени размыкания при заданных параметрах размыкаемой цепи и тиристорного коммутатора. Результаты расчета подтверждены экспериментально.

В [1] показано, что размыкание цепей постоянного тока с индуктивностью за время  $\Delta t \rightarrow 0$  приводит к изменению потокосцепления индуктивности от начального значения  $\Psi = L \cdot i_0$  до нуля. При этом теоретически в индуктивности возникает импульс перенапряжения  $u_L = \frac{d\Psi}{dt}$  бесконечной величины.

На практике коммутация цепей постоянного тока, содержащих индуктивную нагрузку или имеющих внутреннюю индуктивность – линий электропередач, линий связи, цепей с генераторами и двигателями постоянного тока и т.д., осуществляется при помощи электромеханических устройств – пускателей, контакторов и т.п., имеющих конечное время срабатывания  $\Delta t$ , что сопровождается возникновением дуги на размыкающих контактах, а также перенапряжением на индуктивности, в 5...7 раз превышающем напряжение источника питания.

Автором было разработано устройство для размыкания цепей постоянного тока с внутренней индуктивностью или с индуктивностью в виде сопротивления нагрузки, на основе тиристоров (рис. 1), которое не имеет электромеханических коммутаторов [2].

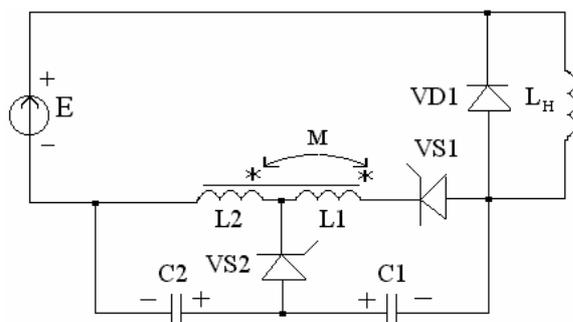


Рис. 1. Принципиальная схема тиристорного коммутатора

Подключение нагрузки  $L_H$  к источнику постоянной ЭДС  $E$  осуществляется при помощи тиристора VS1, при этом ток течет через нагрузку  $L_H$ , тиристор VS1, и последовательно включенные индуктивно-связанные катушки  $L1$  и  $L2$ , которые имеют согласное включение и одинаковые параметры. Известно, что для отключения тиристора необходимо обеспечить переход тока в нем через нулевое значение, поэтому при отключении нагрузки от источника срабатывает тиристор VS2, который приводит к разряду двух одинаковых конденсаторов  $C1$  и  $C2$ , предварительно заряженных от внешнего источника напряжения (не показан) до одинакового напряжения

через индуктивно-связанные катушки  $L1$  и  $L2$ , включенные при разряде конденсаторов встречно. При этом потокосцепление в катушке индуктивности  $L2$  уменьшается до нуля, и ток в тиристоре VS1 переходит через нулевое значение, что приводит к отключению тиристора VS1 и к размыканию цепи с нагрузкой  $L_H$ . Запасенная в нагрузке энергия шунтируется диодом VD1. Преимуществом данной схемы является то, что на переходный процесс при разряде конденсаторов не оказывают влияние параметры нагрузки  $L_H$ . Очевидно, что параметры конденсаторов  $C1$  и  $C2$ , а также индуктивностей  $L1$  и  $L2$  должны обеспечивать колебательный переходный процесс, который с учетом одинаковых значений разрядных токов в конденсаторах при встречном включении индуктивностей будет описываться дифференциальным уравнением для тока  $i_L$  в тиристоре VS1:

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 i_L}{dt^2} + R \cdot C \cdot \frac{di_L}{dt} + i_L = 0.$$

Здесь  $L = L1 - M$ ;  $C = C1$ ;  $R$  – активное сопротивление каждой из катушек индуктивности;  $M = K \cdot \sqrt{L1 \cdot L2} = K \cdot L1$  – взаимная индуктивность, где  $0 \leq K \leq 1$  – коэффициент связи катушек. Решение данного уравнения согласно классическому методу расчета переходных процессов [3] записывается в виде суммы принужденной и свободной составляющих:

$$i_L = i_{Lnp} + i_{Lce} = I + A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_{ce} \cdot t + \gamma),$$

где  $A$  и  $\gamma$  – постоянные интегрирования,  $\delta$  – коэффициент затухания, а  $\omega_{ce}$  – угловая частота колебаний тока свободной составляющей. Принимаем величины тока в индуктивности и напряжения на емкости до коммутации тиристора VS2:  $i_L(0_-) = I$ ;  $u_C(0_-) = U$ , из характеристического уравнения  $L \cdot C \cdot P^2 + R \cdot C \cdot P + 1 = 0$  определим

$$\delta = -\frac{R}{2 \cdot L}, \quad \omega_{ce} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}}.$$

Условием колебательного переходного процесса является неравенство  $\frac{1}{L \cdot C} \geq \frac{R^2}{4 \cdot L^2}$ , следовательно для параметров индуктивностей должно выполняться условие  $L \geq \frac{R^2 \cdot C}{4}$ . Напряжение на индуктивности в первый момент времени  $t=0_+$  после коммутации определим по второму закону Кирхгофа:

$$u_L(0_+) = -u_C(0_-) - i_L(0_-) \cdot R = -U - I \cdot R.$$

Постоянные интегрирования найдем из решения системы двух уравнений в момент времени  $t=0_+$ :

$$i_L(0_-) = I + A \cdot \sin \gamma;$$

$$u_L(0_+) = -\delta \cdot L \cdot A \cdot \sin \gamma + L \cdot \omega_{cs} \cdot A \cdot \cos \gamma;$$

откуда получаем:  $\gamma=0$ ,  $A = -\frac{U+I \cdot R}{L \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}}}$ ,

окончательно ток переходного процесса в тиристоре VS1 составит:

$$i_L = I - \frac{U+I \cdot R}{L \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}}} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \cdot t\right).$$

Поскольку  $\gamma=0$ , то переход тока  $i_L$  через нулевое значение осуществляется за время

$$t_1 = \frac{T_{cs}}{4},$$

где  $T_{cs} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{cs}}$  – период колебаний тока свободной составляющей, откуда получаем

$$t_1 = \frac{1,57}{\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}}},$$

при этом  $\sin(\omega_{cs} \cdot t_1) = 1$ . Из условия равенства  $i_L = 0$  определим величину напряжения заряда конденсаторов, обеспечивающего выполнение данного условия при заданных параметрах схемы  $R, L, C$ , а также при известном токе  $I$ :

$$U = I \cdot \left( L \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \cdot e^{-\frac{R}{2L} t_1} - R \right).$$

При небольших значениях  $R$  в силовых цепях постоянного тока получаем приближенные расчетные формулы для напряжения заряда конденсаторов и времени коммутации тиристора VS1:

$$U \approx I \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad t_1 \approx 1,57 \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Так, например, при  $L=0,1$  Гн,  $C=500$  мкФ,  $R=0,1$  Ом для размыкания цепи с током  $I=100$  А, независимо от величины индуктивности нагрузки  $L_H$ , рабочее напряжение конденсаторов будет равно  $U=1414$  В, время размыкания цепи составит  $t_1=0,011$  с.

Экспериментальные исследования модели тиристорного коммутатора были проведены при по-

мощи программы Electronics Workbench для схемы, рис. 2, с индуктивной нагрузкой  $L_H=5$  Гн, рабочим напряжением источника питания  $U=200$  В. Ток в нагрузке  $I$  составлял 102 А.

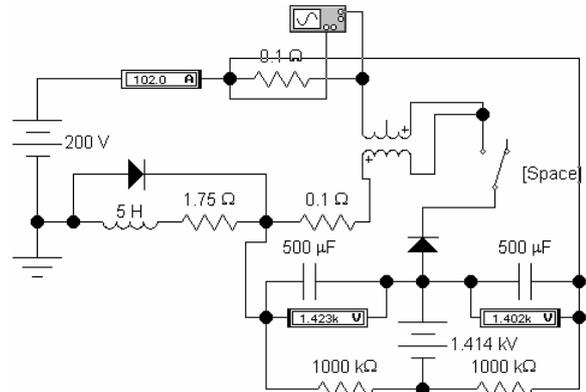


Рис. 2. Экспериментальная схема тиристорного коммутатора

На рис. 3 показана осциллограмма тока размыкаемой цепи. Время перехода тока через нулевое значение (средняя линия на экране осциллографа) с момента срабатывания ключа составляет  $t_1=0,011$  с, что полностью совпадает с результатами расчета. В данной схеме отсутствует тиристор VS1, поэтому ток нагрузки после разряда конденсаторов восстанавливает своё первоначальное значение.

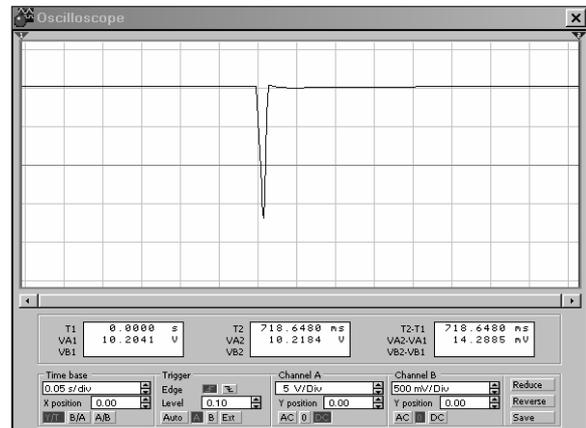


Рис. 3. Осциллограмма тока в нагрузке

Таким образом, исследованная схема тиристорного коммутатора может быть использована при коммутации электросиловых цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой или внутренней индуктивностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галинский П.П., Кононов А.П. и др. Теоретические основы электротехники в задачах. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975. – 294 с.

2. Пат. 2257004 РФ. МПК<sup>7</sup> H03K 17/00. Тиристорный выключатель постоянного тока / С.В. Пустынников. Заявлено 25.05.2004; Опубл. 20.07.2005, Бюл. № 20. – 2 с.: ил.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.