

Б-24

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



20/2-74

P9 - 7773

1980/2-74

Л.С.Барабаш, С.М.Бийский, В.А.Тимохин

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ
РАБОТЫ КОММУТАТОРОВ ТОКА
НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

1974

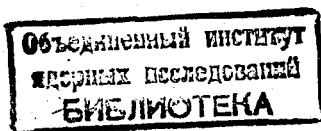
ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P9 - 7773

Л.С.Барабаш, С.М.Бийский, В.А.Тимохин

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ
РАБОТЫ КОММУТАТОРОВ ТОКА
НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Направлено в ПТЭ



Введение

Большой интерес, появившийся в последнее время к тиристорам, объясняется возможностями схем, в которых тиристоры используются в качестве коммутаторов. Малые удельные габариты, весьма высокое прямое и обратное напряжение, большие импульсные токи и большой срок службы - все эти качества тиристоров позволяют реализовать схемы генераторов мощных импульсных токов.

В настоящей работе рассмотрены некоторые особенности схем на тиристорах и мощных полупроводниковых вентилях, используемых для питания импульсных безжелезных магнитов.

Особенности работы тиристоров на индуктивную нагрузку

Рассмотрим схему, состоящую из конденсатора C , заряженного до напряжения U_c , и индуктивности нагрузки L , на которую разряжается конденсатор C при включении тиристора T /рис. 1/. Это схема обычного контура и применяется она довольно широко для получения мощных импульсов тока в индуктивной нагрузке. Цепь, состоящая из диода D и дросселя $L_{др} \gg L$, является цепью рекуперации энергии.

На рис. 1/б-е/ показаны временные диаграммы работы схемы. В момент времени t_1 включается тиристор T . Напряжение на конденсаторе C /рис. 1б/ и индуктивности L /рис. 1в/ изменяются по закону:

$$U = U_c e^{-\delta t} \cdot \cos \omega t,$$

где $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}$ и $\delta = \frac{r}{2L}$, r - вносимое в контур сопротивление ключа, омическое сопротивление индуктивности L , подводящих шин и т.п.

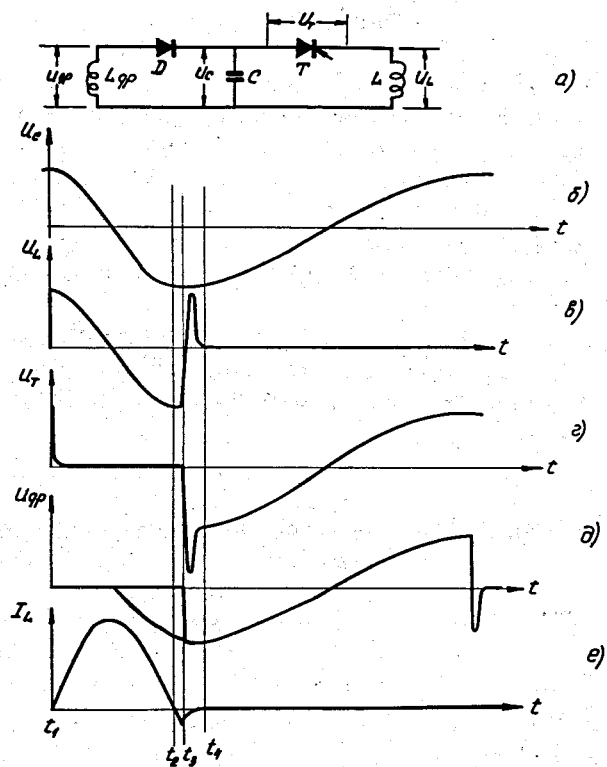


Рис. 1. а - схема контура для формирования импульса тока в индуктивности. Временные диаграммы напряжений на элементах контура: б - на конденсаторе, в - на индуктивности L , г - на тиристоре, д - на индуктивности $L_{др}$, е - осциллограмма тока в индуктивности L .

Ток через индуктивность описывается формулой

$$I_L = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t = \frac{U_c}{\rho} e^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - характеристическое сопротивление контура.

Поскольку тиристор не является идеальным ключом, с момента времени t_2 ; когда ток в индуктивности меняет свою полярность, до момента времени t_3 тиристор пропускает обратный ток без искажений, и только начиная с момента времени t_3 резко возрастает сопротивление тиристора. В промежутке времени $t_3 \div t_4$ восстанавливаются вентильные свойства тиристора. Это приводит к тому, что на индуктивной нагрузке возникает всплеск напряжения, который по амплитуде может в несколько раз превышать U_c и полностью прилагаться к тиристору. Перенапряжения, возникающие на индуктивности, могут привести к пробое тиристоров. Такая же картина наблюдается в цепи обратной перезарядки емкости C . При восстановлении вентильных свойств диодов и обрыве тока через индуктивность $L_{др}$ наблюдается такой же всплеск по напряжению.

Для защиты коммутаторов от перенапряжений используется шунтирующая емкость $C_{ш}$ и сопротивление $R_{ш}$, включенное либо последовательно с емкостью $C_{ш}$ /рис. 2а/, либо параллельно индуктивности L /рис. 2б/.

Величина сопротивления $R_{ш}$ в схеме рис. 2а выбирается из условия:

$$R_{ш} \sim 2 \rho_{ш}, \quad \text{где } \rho_{ш} = \sqrt{\frac{L(C+C_{ш})}{C \cdot C_{ш}}}$$

При использовании схемы рис. 2б величина сопротивления $R_{ш}$ определяется как

$$R_{ш} \sim \frac{\rho_{ш}}{2}$$

Схема рис. 2а имеет меньшую эффективность подавления выброса по напряжению. Вторая схема позволяет полностью избавиться от этого неприятного явления, хотя при этом падает добротность контура.

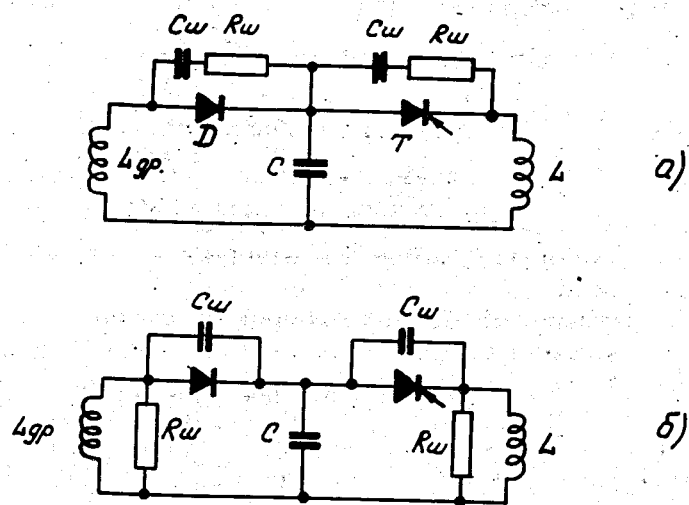


Рис. 2. Принципиальные схемы включения защитных элементов $R_{ш}$, $C_{ш}$.

Необходимо остановиться еще на одной проблеме, возникающей при использовании тиристорных схем. Она связана с допустимой скоростью нарастания тока через тиристор. Скорость нарастания тока di/dt ограничена, и ее превышение приводит к локальным перегревам структуры и выходу из строя тиристора. Если в схеме рис. 1а определенная скорость нарастания тока обеспечивается выбором параметров L и C , то при использовании емкости $C_{ш}$ можно снова нарушить это условие. Конденсатор $C_{ш}$ перед включением тиристора заряжен до напряжения U_c и при срабатывании схемы разряжается на открытый тиристор. Сопротивление $R_{ш}$ в схеме рис. 2а ограничивает максимальную амплитуду тока через тиристор, но и в этой схеме возможно превышение допустимой скорости нарастания тока, кроме того, применение сопротивления $R_{ш}$ существенно искажает распределение обратных напряжений на тиристорах при использовании последовательного соединения элементов коммутатора.

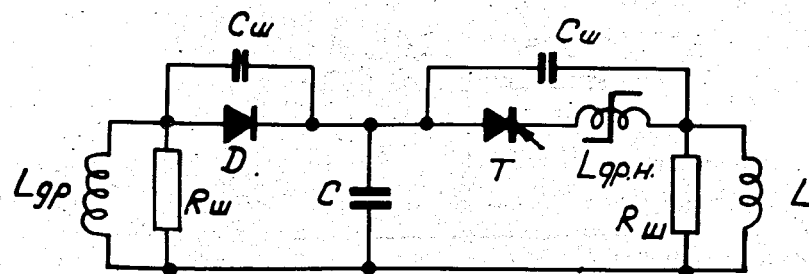


Рис. 3. Схема включения дросселя насыщения.

Более эффективной мерой, обеспечивающей определенную скорость нарастания тока и не влияющей на распределение обратных напряжений, является использование дросселя насыщения $L_{др.н.}$, включенного последовательно с каждым тиристором /см. рис. 3/. Эта мера является необходимой, хотя при использовании дросселей насыщения несколько искажается форма тока в нагрузке и понижается к.п.д. схемы.

Последовательное включение элементов коммутатора

Чтобы получить высокую добротность контура, применяемого для формирования тока, необходимо использовать высокоиндуктивные катушки, что приводит к повышению напряжения на конденсаторе и, соответственно, повышает требования к коммутатору. Паспортные значения напряжений, которые выдерживают тиристоры, составляют ~ 1 кв., поэтому при более высоких напряжениях применяется последовательное включение тиристорных и диодных. При этом необходимо обеспечить равномерное распределение прямых и обратных напряжений.

Для обеспечения равномерного распределения напряжений на элементах коммутаторов по постоянному току используются сопротивления, включенные параллельно каждому элементу. Величины сопротивлений определяются токами утечки тиристорных или диодных /2/

$$R \leq \frac{n U - U_{\max}}{(n-1) I_{\text{ут. max}}},$$

где n - число последовательно включенных элементов, U - наибольшее допустимое напряжение на элементе, U_{\max} - наибольшее напряжение на коммутаторе, $I_{\text{ут. max}}$ - паспортные токи утечки тиристоров.

После прохождения мощного импульса тока через тиристоры на них подается обратное напряжение, равное напряжению, до которого перезарядился конденсатор C / см. рис. 1г/. Из-за разброса во времени восстановления вентильных свойств последовательно включенные тиристоры запираются в разное время. Причем время запира-ния зависит от обратного тока через тиристор. На рис. 4 показаны осциллограммы распределения обратных напряжений на двух последовательно включенных тиристорах. Импульсы запуска синхронизации осциллографа задержаны относительно начала импульса тока на время 1,2 мсек. Нижняя осциллограмма показывает изменение напряжения на конденсаторе U_c , начало ее соответствует началу перезарядки емкости C . Верхняя осциллограмма показывает изменение напряжения на индуктивности L . Параллельно тиристорам включены только выравнивающие сопротивления 25 кОм. Как видно из рисунка, в первый момент времени все напряжение приложено к первому закрывшемуся тиристор, затем закрывается второй тиристор и напряжение на них распределяется равномерно. Время запира-ния второго тиристора в данном случае равно ~ 150 мксек.

Амплитуда импульса тока, протекавшего через тиристоры, была равна ~ 800 А. При токах 3 ÷ 4 кА это время для некоторых тиристоров достигает 500 ÷ 700 мксек. Включением параллельно каждому тиристоры конденсатора $C_{\text{ш}}$ можно добиться достаточно хорошего распределения обратных напряжений на последовательно включенных тиристорах. Величина емкости $C_{\text{ш}}$ существенно зависит от амплитуды импульса, протекавшего через тиристоры. На рис. 5 мы приводим график, снятый при токе 5 кА, характеризующий степень выравни-

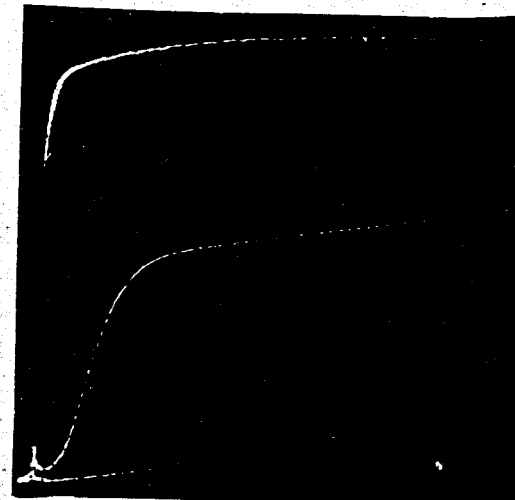


Рис. 4. Осциллограммы распределения обратных напряжений на двух тиристорах. $U_c = 1$ кВ, $R = 25$ кОм.

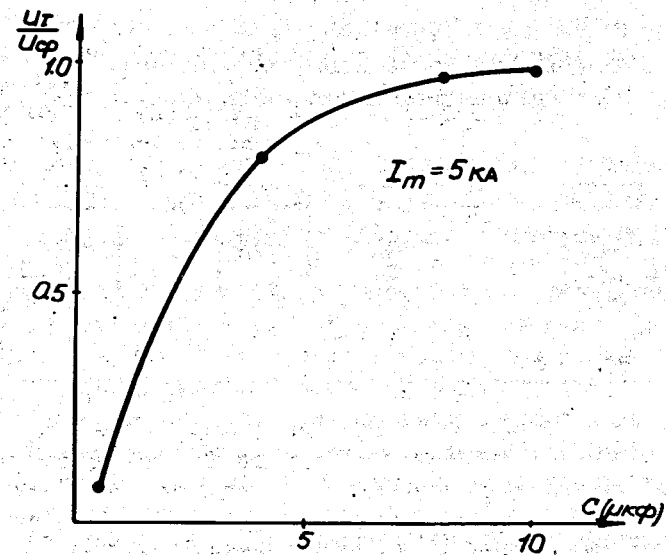


Рис. 5. Зависимость амплитуды обратного напряжения на тиристоре от величины емкости $C_{\text{ш}}$.

нивания напряжений на двух последовательно включенных тиристорах в зависимости от величины конденсатора C_{III} .

Следует заметить, что постоянная $R \cdot C_{III}$ должна быть малой по отношению к периоду следования импульсов тока и при определенных C_{III} и R есть ограничение на частоту срабатываний системы.

Другой, более привлекательной и более эффективной мерой, применяющейся для обеспечения равномерного распределения обратных напряжений на тиристорах, является использование лавинных вентилях, схема включения которых показана на рис. 6. Для защиты элементов от перенапряжений в схеме используются два лавинных диода, включенных навстречу друг другу. Напряжение на элементе схемы в этом случае определяется напряжением лавинообразования диодов. Сопротивления R используются для выравнивания напряжений по постоянному току. Напряжение заряда конденсатора C должно быть

$$U_c < n U_{л}$$

где n - количество элементов, включенных последовательно, $U_{л}$ - напряжение лавинообразования.

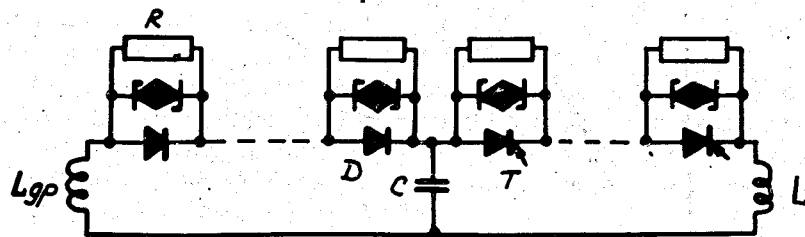


Рис. 6. Схема включения лавинных диодов.

В случае, если напряжение U_c меньше $n U_{л}$ на несколько κB , может наблюдаться следующая картина. Тиристоры, время закрывания которых больше, чем других, включенных с ними последовательно, запираются значительно позже. По времени это может составить

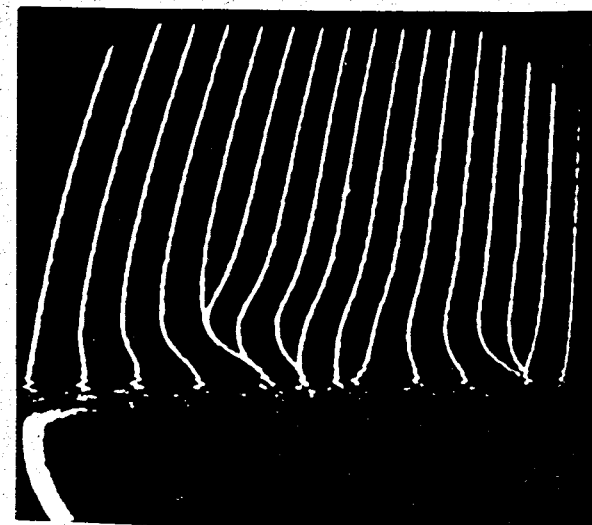


Рис. 7. Осциллограмма распределения обратных напряжений на 16 тиристорах типа Т-320, включенных последовательно.

50 ÷ 100 мксек. В качестве иллюстрации к сказанному выше на рис. 7 показаны осциллограммы распределения запирающих напряжений на 16 тиристорах типа Т-230, включенных последовательно. Параллельно каждому тиристоры включены два диода типа ВЛ-50 с напряжением лавинообразования $U_{л} = 1,3 \kappa B$. Напряжение U_c было равно 14 κB , ток, протекающий через тиристоры, ~ 5 κA , длительность импульса тока ~ 1,2 мсек.

Для оценки времени закрывания тиристоров в этом случае была снята осциллограмма тока с пояса Роговского, показанная на рис. 8. Время задержки импульса запуска синхронизации осциллографа составляет 1,2 мсек относительно начала импульса тока. Амплитуда меток составляет 0,1 В, что в пересчете на ток равно 67,5 А, период следования меток равен 5 мксек. Видно, что обратный ток через тиристоры достигает значения ~70 А, после чего тиристоры начинают закрываться. Время вос-

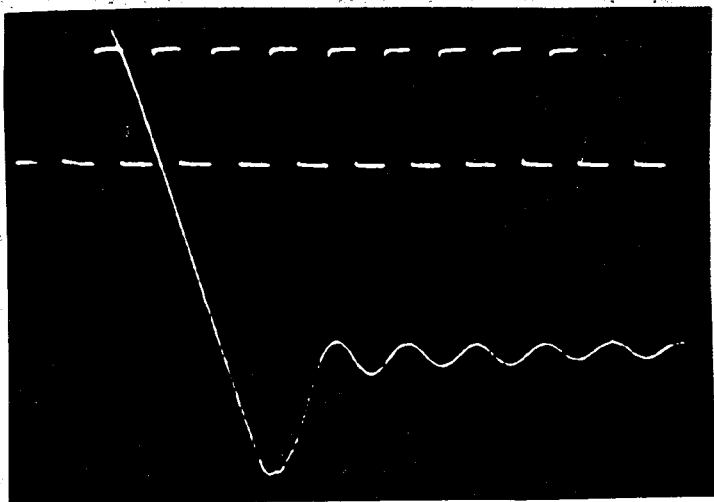


Рис. 8. Осциллограмма тока через тиристоры. Амплитуда меток - 67,5 А, период следования 5 мксек.

становления вентильных свойств составляет 3-5 мксек. За это время лавинные диоды коммутируют энергию ~ 0,4 Дж, что не превышает паспортных значений для диодов ВЛ-50.

На основе описанных схем были отработаны коммутаторы для системы формирования импульсного магнитного поля. Параметры коммутаторов: напряжение - 30 кВ, коммутируемый ток - 5±6 кА, форма импульса тока - полупериод синусоиды, длительность импульса по основанию - 1,2 мсек.

В блоках использованы тиристоры типа Т-320, вентили типа В-500 и лавинные диоды ВЛ-50. Блоки испытывались при частотах 0,2 ÷ 1 Гц.

В заключение авторы выражают свою признательность В.П.Саранцеву и В.А.Свиридову за постоянный интерес к работе, В.И.Клементьеву, А.М.Бирюкову, В.В.Полякову, А.Я.Жукову, Ю.А.Шевченко, принимавшим активное участие в монтаже блоков.

Литература

1. Л.Р.Нейман, П.Л.Калантаров. Теоретические основы электротехники, ч. II, Госэнергоиздат, 1954.
2. Тиристоры. Технический справочник. Издательство "Энергия", 1971 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 февраля 1974 года.