

Особенности учета потерь мощности

при включении высоковольтных тиристоров большой площади

Владимир Веревкин, к. т. н.
Виктор Костусяк

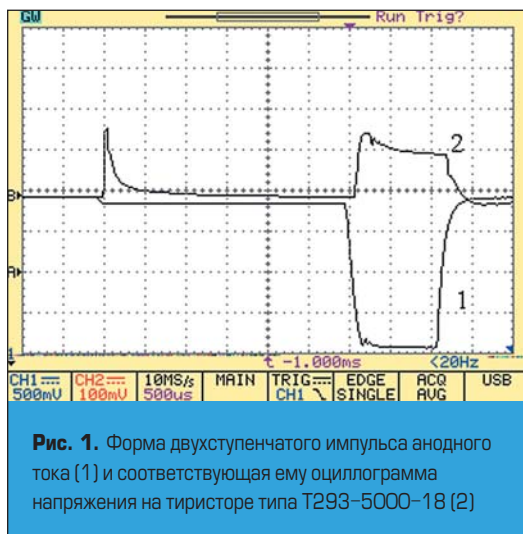
В соответствии с общепринятыми представлениями, потери мощности при включении низкочастотных тиристоров пренебрежимо малы по сравнению со статическими. Этот взгляд нашел отражение, например, в справочнике фирмы АВВ [1], в соответствии с которым потерями при включении тиристора при его работе на промышленной частоте можно пренебречь. Так, для тиристора типа 5STP45N2800 при амплитуде прямоугольного импульса тока 4 кА и скорости его нарастания порядка 10 А/мкс потери мощности при включении составляют около 0,45 Дж. При рабочей частоте 50 Гц это составляет 22,5 Вт, в то время как статические потери — 1,5–2,0 кВт.

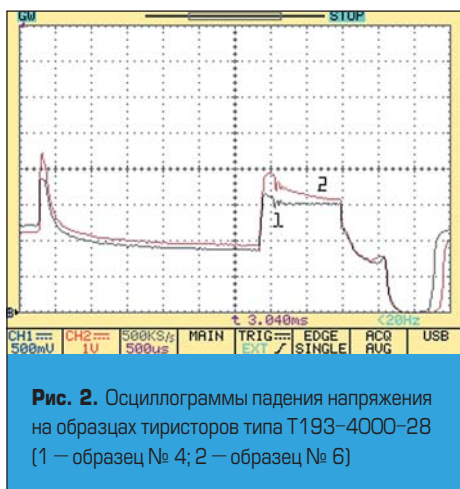
Исследования процесса распространения включенного состояния в мощных высоковольтных тиристорах большой площади показали, что вклад потерь мощности при включении тиристора в суммарные потери намного больше, чем это принято считать. Причем, величина потерь мощности при включении обусловлена, в первую очередь, длительностью процесса распространения включенного состояния, а не коммутационными потерями, обусловленными высокой скоростью нарастания анодного тока. Значения скорости нарастания анодного тока при включении тиристоров в выпрямителях приводов постоянного тока весьма незначительны. А скорость распространения включенного состояния при высо-

кой плотности шунтировки не превышает 40 мкм/мкс [2, 3]. Следовательно, время распространения включенного состояния высоковольтных тиристоров с диаметром выпрямительного элемента 96 мм составляет порядка 1 мс, что сопоставимо с длительностью фазы проводимости в трехфазной мостовой схеме.

В предложенной работе для оценки влияния процесса распространения включенного состояния на мощность потерь исследовались временные зависимости падения напряжения на тиристоре при протекании через него прямоугольного импульса тока в диапазоне времени 3–4 мс. Установка измерения импульсного напряжения в открытом состоянии, описанная в [4], обеспечивает протекание через тиристор импульса тока двухступенчатой формы (рис. 1). Длительность первой ступени равна 3,5 мс, амплитуда 100–500 А. Длительность второй ступени составляет около 500 мкс, амплитуда регулируется от 500 А до 15 кА. Формирователь импульса тока реализован по схеме источника тока, что позволяет обеспечить погрешность задания и стабилизации тока не более 0,5%. Высокая стабильность тока во времени позволяет точно оценить изменение во времени падения напряжения, которое обусловлено модуляцией сопротивления базовых областей полупроводниковой структуры и распространением включенного состояния по ее площади. Более того, по амплитуде и длительности выброса напряжения в начале второй ступени тока можно судить о том, включилась ли тиристорная структура к этому моменту времени полностью, или нет. Если тиристорная структура включилась полностью, то выброс напряжения на тиристоре, возникающий на переднем фронте импульса тока второй ступени, обусловлен только процессом модуляции сопротивления базовых областей, а его длительность определяется, в основном, временем жизни неосновных носителей заряда в *n*-базе (порядка 100 мкс для высоковольтных тиристоров). У тиристорной структуры, которая полностью не включается за время протекания тока первой ступени, амплитуда и длительность выброса напряжения значительно больше.

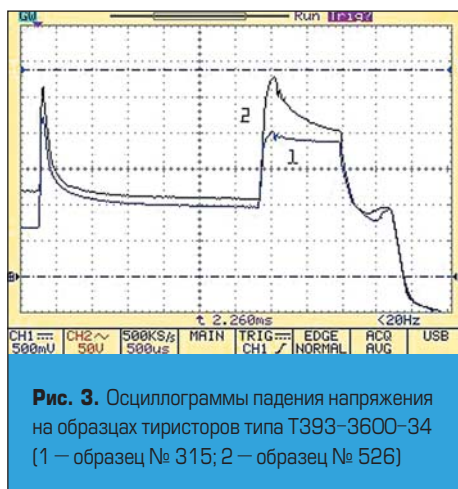
В ходе эксперимента проводилась качественная оценка времени полного включения образцов высоковольтных тиристоров различных типов. Значения импульсного напряжения в открытом состоянии,





определяющие величину статических потерь мощности, у исследуемых образцов были практически равны.

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы падения напряжения на тиристорах типа T193-4000-28 с диаметром выпрямительного элемента 101 мм производства ОАО «Электровыпрямитель» и тиристоры T393-3600-34 с диаметром выпрямительного элемента 96 мм производства ООО «Элемент-Преобразователь». Импульс тока, протекающего через тиристоры, имел форму, представленную на рис. 1. Уровень тока первой ступени был равен 500 А, амплитуда второй ступени — 12560 А. Значения импульсного напряжения в открытом состоянии (U_{TM}) тиристоры T193 отличаются друг от друга незначительно — 1,55 и 1,60 В. Но образец № 6 включается значительно медленнее. Судя по значительному выбросу напряжения в момент резкого увеличения тока через тиристор, он полностью не включился за время, равное длительности первой ступени — около 3 мс. У данного образца потери мощности при включении прибора составят примерно 10% от величины статических потерь, что значительно превышает традиционные оценки. Аналогичная картина наблюдается и у более высоковольтных тиристоры T393-4000 с напряжениями загиба ВАХ порядка 4000 В. Исследуемые образцы имеют близкие значения U_{TM} — 1,92 и 2,00 В, но разное время полного включения полупроводниковой



структуры и, следовательно, разные потери мощности во время работы в выпрямителе. Конечно, в реальном режиме эксплуатации при больших токах и, следовательно, при большей плотности тока скорость распространения включенного состояния выше, чем в описанном эксперименте, но данный эффект все равно имеет место.

Необходимо отметить, что у высоковольтных тиристоры различных производителей в рамках одной партии изделий наличествуют образцы с совершенно разными временами полного включения тиристорной структуры при весьма незначительном разбросе значений U_{TM} , измеренных по общепринятой методике. Также установлено, что низкая скорость распространения включенного состояния наблюдается только у образцов высоковольтных тиристоры. У тиристоры с напряжениями загиба ВАХ менее 2500 В скорость распространения включенного состояния значительно выше. Для сравнения на рис. 1 приведена типичная осциллограмма падения напряжения тиристора T293-5000-18 производства ООО «Элемент-Преобразователь».

Процесс распространения включенного состояния в интервале времени 50–2000 мкс может быть описан диффузионным механизмом [5]. В соответствии с этой моделью, включение структуры в определенной точке происходит, когда накопленный в *p*-базе заряд превышает некоторое критическое значение, соответствующее току включения структуры. Скорость

распространения включенного состояния тем выше, чем больше коэффициенты инжекции эмиттерных переходов, больше коэффициенты переноса неосновных носителей заряда через базы и меньше толщины базовых слоев *p-n-p-n*-структуры. Тогда описываемый эффект у высоковольтных тиристоры можно объяснить особенностями, которые имеет профиль распределения легирующих примесей в диффузионной *p-n-p-n*-структуре большой толщины, отличающейся низкими коэффициентами передачи и большими толщинами базовых областей.

Выводы

- Предложен эффективный метод оценки времени полного включения тиристоры и оборудование для его реализации.
- Исследован процесс распространения включенного состояния мощных высоковольтных тиристоры. Установлено, что отдельные образцы могут иметь anomalно большое время полного включения тиристорной структуры, сопоставимое с продолжительностью фазы проводимости в выпрямителе.
- Поскольку вклад потерь мощности при включении высоковольтных тиристоры может составлять до 10%, необходимо избегать необоснованного применения тиристоры с завышенным классом.

Литература

1. Тиристоры. Справочник фирмы ABB Semiconductors AG.
2. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н. и др. Расчет силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1980.
3. Strack H. Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Kurzschlußbemitterdimensionierung auf das Zündverhalten von Thyristoren. Siemens Forsch. Und Entw. Berlin. 1976.
4. Вережкин В. В., Костусяк В. С., Лютиков С. Д. Новое поколение испытательного оборудования для силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. 2007. № 2.
5. Дерменжи П. Г., Евсеев Ю. А. Распространение включенного состояния в *p-n-p-n*-структурах // ФТП. 1973. № 2.