

СИЛКИН Д. С., ПАДЕРОВ В. П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ТИРИСТОРА НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В СХЕМЕ ИНВЕРТОРА ТОКА

Аннотация. В программе «Saber» проведено моделирование влияния времени жизни носителей заряда в базовых областях тиристора на мощность коммутационных потерь в тиристорах в схеме инвертора тока при их последовательном соединении. Исследовано влияние разброса зарядов обратного восстановления и времен жизни в последовательном соединении тириستоров при последовательном соединении на коммутационные потери. Рассчитан относительный перегрев тиристоров, возникающий из-за разброса параметров.

Ключевые слова: инвертор тока, физическая кусочно-зарядовая модель тиристора, мощность коммутационных потерь в тиристорах при их последовательном соединении.

SILKIN D. S., PADEROV V. P.

MODELING OF THE INFLUENCE OF THYRISTOR MODEL PARAMETERS ON ITS SWITCHING LOSSES IN THE CURRENT INVERTER CIRCUIT

Abstract. The software "Saber" was used to study the dependence of the carrier lifetime in the thyristor drift-regions on its switching power losses in the current inverter circuits with serial connection. The influence of the reverse recovery charge and carrier lifetime dispersion in the thyristors with serial connection on the switching losses was studied. The thyristor relative overhear connected to the dispersion of parameters was calculated.

Keywords: current inverter, thyristor lumped-charge physical model, switching power losses in thyristors with serial connection.

Современные программы схемотехнического моделирования включают не только поведенческие модели активных электронных компонентов, которые воспроизводят поведение в схеме по электрическим параметрам прибора, но и физические модели, которые построены на уравнениях физики полупроводников и отражают взаимосвязь электрических параметров прибора и физических параметров его структуры. К таким моделям относится и физическая кусочно-зарядовая модель тиристора scr2 [1], входящая в состав программы схемотехнического моделирования «Saber».

В физической кусочно-зарядовой модели scr2 в качестве входных параметров задаются следующие величины:

- 1) Заряды электронов (q_b) и дырок (q_{bp}) в n -базе при термодинамическом равновесии;
- 2) Заряды электронов (q_{gn}) и дырок (q_g) в p -базе при термодинамическом равновесии;

- 3) Времена жизни неосновных носителей заряда в n^- - и p -базе (τ_{aub} и τ_{aug} , соответственно);
- 4) Времена пролета носителей через n^- - и p -базу ($\tau_{p10}+\tau_{p20}$ и $\tau_{p30}+\tau_{p40}$, соответственно);
- 5) Барьерная емкость n^- - p перехода при нулевом смещении (c_{jo2});
- 6) Отношение объема n^- -базы к объему p -базы (f_v);
- 7) Коэффициент сужения обедненной области со стороны p -базы (f_{j2g});
- 8) Коэффициент, определяющий, является n^- - p переход резким или плавным (m_{j2});
- 9) Коэффициент в барьерной емкости n^- - p перехода при прямом смещении (fc_{j2});
- 10) Максимальное напряжение пробоя n^- - p перехода (v_{j2bk0});
- 11) Сопротивление, включенное последовательно с анодом (r_{as});
- 12) Сопротивление катодного шунта (r_{sh}).

Среди них физическими параметрами полупроводниковой структуры, способными повлиять на коммутационные процессы в тиристоре, являются заряды основных носителей в базах, определяемые уровнем легирования, времена жизни, времена пролета и барьерная емкость. Для того чтобы определить параметры, оказывающие наибольшее влияние на коммутационные потери, была рассчитана мощность коммутационных потерь для тиристора ТБИ173-2000 с номинальными параметрами в схеме инвертора тока (рис. 1).

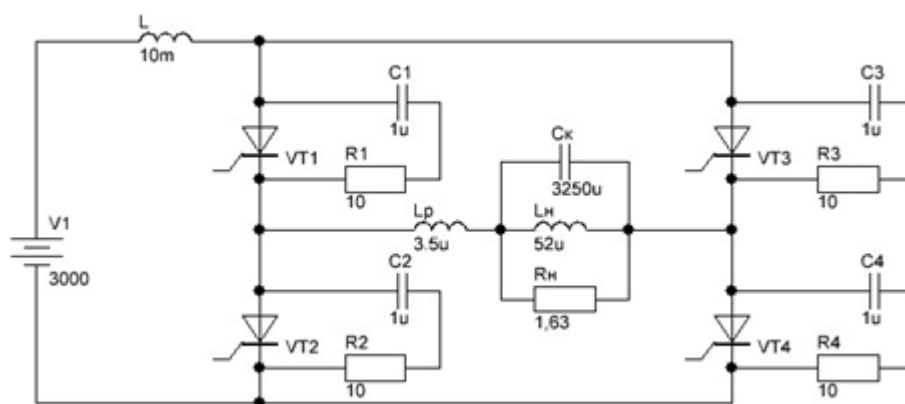


Рис. 1 Упрощенная схема инвертора тока. В каждом плече инвертора – 4 тиристора.

После этого к каждому из этих параметров, по очереди, давалось приращение в 50% от номинального значения. Затем заново рассчитывалась мощность коммутационных потерь, и вычислялось изменение мощности $\Delta P_{ком}$ относительно номинальной. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Влияние параметров модели на мощность коммутационных потерь

Параметр	qg	qb	taub	taug	tp10+tp20	tp30+tp40	cjo
$\Delta P_{\text{ком}}, \%$	1.25	-0.417	59.4	10.24	-15.2	3.45	0.0758

Из таблицы видно, что наибольшее влияние на мощность коммутационных потерь оказывает время жизни в n -базе. Кроме него существенно влияние времени жизни в p -базе и времени пролёта n -базы. Время пролёта зависит от механизмов переноса заряда (диффузионный или дрейфовый) и определяется формулами [2]:

$$t_{t,dif} = \frac{W_b^2}{2D} \quad , \quad t_{t,drift} = \frac{W_b^2}{\mu V} \quad (1)$$

где $t_{t,dif}$ – время пролёта, определяемое диффузионным механизмом переноса носителей заряда, $t_{t,drift}$ – время пролёта, определяемое дрейфовым механизмом переноса носителей заряда, W_b – ширина n -базы, D – коэффициент диффузии носителей заряда, μ – подвижность дырок, V – напряжение, падающее на n -базе. Таким образом, время пролёта определяется, в основном, шириной базовой области и зависит от напряжения, падающего на n -базе. Ширина базовой области в тиристорах сильно изменяться не может, следовательно, не может сильно изменяться и время пролёта. Поэтому использовать время пролёта для управления коммутационными потерями не имеет смысла.

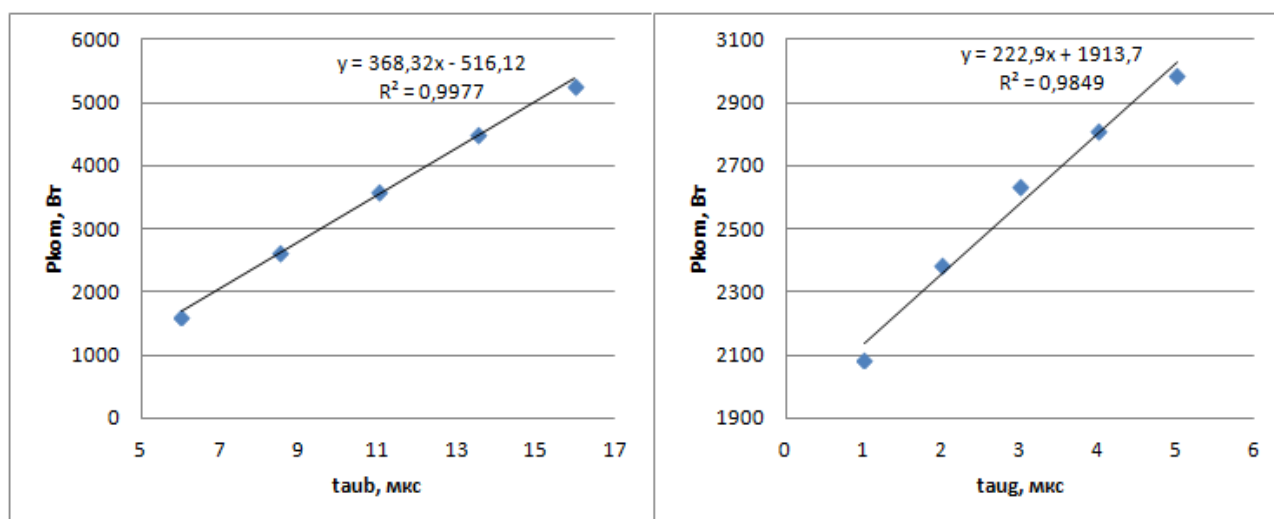


Рис. 2 Зависимость мощности коммутационных потерь от времен жизни в базах тиристора.

Времена жизни неосновных носителей в базовых областях зависят от многих факторов и могут сильно варьироваться. Существуют методы регулирования времени жизни в базовой области [3; 4; 5]. Поэтому изменение времени жизни в базовых областях тиристоров можно использовать для контроля мощности коммутационных потерь. Зависимость мощности коммутационных потерь от времён жизни неосновных носителей в базовых областях приведена на рис. 2.

Влияние времени жизни на коммутационные потери обусловлено тем, что именно время жизни определяет максимальный накопленный заряд в базовой области [6]. В свою очередь, от максимального накопленного заряда и скорости спада тока, в первом приближении, будет зависеть заряд обратного восстановления $Q_{гр}$, который во многом определяет коммутационные потери. Зависимость заряда обратного восстановления от времен жизни в базах приведена на рис. 3. Из графика (рис. 3) видно, что угловой коэффициент зависимости $Q_{гр}(t_{aub})$ меньше, чем угловой коэффициент зависимости $Q_{гр}(t_{aug})$, приблизительно на 40%. Такое же соотношение имеют угловые коэффициенты зависимостей $P_{ком}(t_{aub})$ и $P_{ком}(t_{aug})$ (рис. 2). График зависимости $P_{ком}(Q_{гр})$ приведен на рис. 4.

При последовательном соединении тиристоров немаловажную роль играет разброс параметров. Время жизни в n -области может различаться даже у тиристоров из одной партии, что, в свою очередь, означает наличие разброса $Q_{гр}$ и связанного с ним разбаланса напряжений тиристоров в последовательном соединении [7]. Разбаланс напряжений, в свою очередь, приводит к тому, что в тиристорах выделяется разная мощность коммутационных потерь. При этом возникает разница температур тиристоров, которая может повлиять на параметры приборов, зависящие от температуры, и срок службы и надежность тиристоров.

Для определения максимальной разницы температур в тиристорах в последовательном соединении был определён худший случай, когда разброс $Q_{гр}$ приводит к максимальному разбалансу обратных напряжений при коммутации в плече инвертора тока (рис. 1). Это случай наблюдается тогда, когда один из четырех тиристоров имеет минимальный заряд обратного восстановления в диапазоне, заданном разбросом $Q_{гр}$, в то время как остальные тиристоры – максимальный.

Определить разницу температур можно, предполагая, что тепловые сопротивления переход-корпус тиристоров в последовательном соединении одинаковы. Тогда:

$$\Delta T = \Delta P \cdot R_{th(j-c)} \quad (2)$$

В уравнении (2) ΔT – разница температур кристаллов тиристоров в последовательном соединении, ΔP – наибольшая разница мощностей между тиристорами последовательного соединения, $R_{th(j-c)}$ – тепловое сопротивление переход-корпус тиристоров.

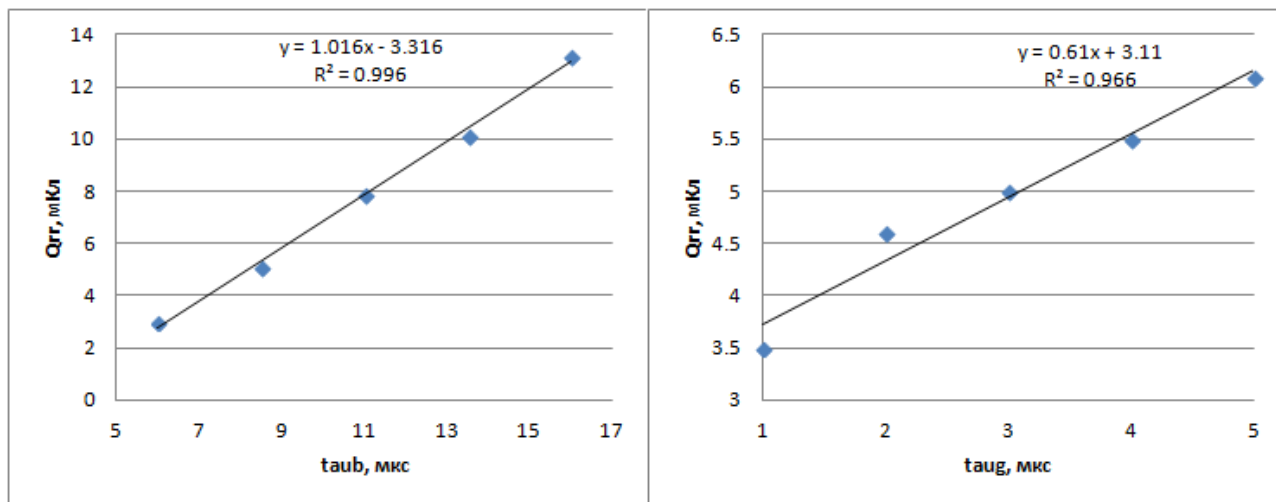


Рис. 3 Зависимость заряда обратного восстановления от времен жизни в базовых областях тиристора.

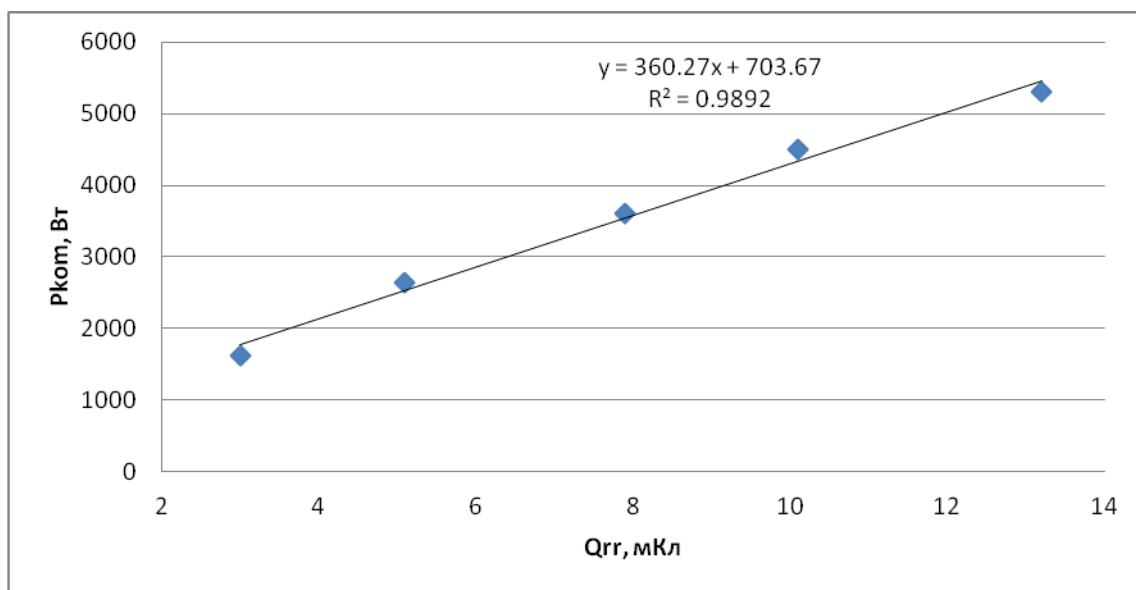


Рис. 4 Зависимость мощности коммутационных потерь от заряда обратного восстановления

В тиристорах одного плеча инвертора тока (рис. 1) для худшего случая были рассчитаны средние мощности потерь за период при разбросе Q_{rr} , равном 5%, 10% и 15%. Далее по известному из справочных данных температурному сопротивлению переход-корпус $R_{th(j-c)}$ тиристора была рассчитана максимальная разница температур тиристоров в

последовательном соединении. Тепловое сопротивление кристалл-корпус тиристора равно 0,008 °C/Вт для двухстороннего охлаждения и 0,016 °C/Вт – для одностороннего [8]. В таблице 2 приведены результаты расчётов для случаев одностороннего (ΔT_{OSC}) и двухстороннего (ΔT_{DSC}) охлаждения приборов.

Таблица 2.

Разница температур тиристорov в последовательном соединении при различных значениях разброса Q_{π}

Разброс Q_{π} , %	5	10	15
ΔT_{OSC} , °C	8,18	15,7	23,6
ΔT_{DSC} , °C	4,09	7,85	11,8

Из значений, приведённых в таблице 2, можно заключить, что зависимость разницы температур кристаллов тиристорov от разброса Q_{π} близка к линейной с угловым коэффициентом, приблизительно равным 0,8 (для ΔT_{DSC}) или 1,6 (для ΔT_{OSC}) °C/%.

На практике достаточно сложно подобрать группу тиристорov с разбросом Q_{π} менее 10%. Кроме того, из-за несовершенства технологии производства возможно наличие разброса тепловых сопротивлений тиристорov в последовательном соединении. В этом случае разница температур может быть ещё больше.

Таким образом, получены следующие результаты:

1. Установлено, что наиболее сильное влияние на мощность коммутационных потерь в тиристорах в схеме инвертора тока оказывает время жизни носителей заряда в p -базовой области тиристора.
2. Из результатов моделирования получены следующие угловые коэффициенты зависимости зарядов обратного восстановления от времен жизни носителей заряда в базовых областях тиристорov $TBI173-2000$ $K_{Q_{\pi}}(\tau_{aub}) = 1016$ Кл/с и $K_{Q_{\pi}}(\tau_{aug}) = 610$ Кл/с, а также угловые коэффициенты зависимости мощности коммутационных потерь от времен жизни $K_P(\tau_{aub}) = 0,386$ Вт/мкс, $K_P(\tau_{aug}) = 0,223$ Вт/мкс и угловой коэффициент зависимости мощности коммутационных потерь от заряда обратного восстановления $K_P(Q_{\pi}) = 0,36$ Вт/мкКл.
3. Разброс заряда обратного восстановления тиристорov при их последовательном соединении приводит не только к перенапряжениям на тиристорах с меньшим зарядом обратного восстановления, но и к повышенной мощности коммутационных потерь на них. Увеличение разброса Q_{π} в схеме инвертора тока (рис.1) способно стать причиной

существенного перегрева тиристора с меньшим зарядом обратного восстановления относительно других. При одностороннем охлаждении тиристора и разбросе $Q_{\text{т}}$ 15% перегрев может доходить до 23,6 °С. Таким образом, высокий разброс $Q_{\text{т}}$ тиристорov в последовательном соединении при недостаточном охлаждении способен стать причиной выхода тиристорov из строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ma C. L., Lauritzen P. O., Sigg J. Modeling of High-Power Thyristors Using the Lumped-Charge Modeling Technique // 6th European Conference on Power Electronics and Applications. – 1995. – Vol. 2. – pp. 15–21.
2. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – NY.: Springer, 2008. – 1069 p.
3. Akiyama H., Kondoh H., Satoh K., Nakagawa T., Fujimoto T., Iwashita Y., Inoue M. Lifetime Control in Thyristors by Proton Irradiation // Bulletin of the Institute for Chemical Research. – Kyoto: Kyoto University, 1992. – pp. 55–60.
4. Siemieniec R., Lutz J. Axial Lifetime Control by Radiation Induced Centres in Fast Recovery Diodes. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.broeselsworld.de/image/work/isps2002_1_save.pdf.
5. Carlson R. O., Sun Y.S., Assalit H.B. Lifetime Control in Silicon Power Devices by Electron or Gamma Irradiation // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1977. – Vol. ED-24, № 8. – pp. 1103–1108.
6. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н., Мамонов В. И., Павлик В. Я., Крюкова Н. Н. и др. Расчёт силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.
7. Абрамович М. И., Бабайлов В. М., Либер В. Е. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
8. Fast switching thyristor TFI173-2000: справочные данные на тиристор ТБИ-173 ОАО «Электровыпрямитель». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.elvpr.ru/en/poluprovodnikprib/tiristory/TFI173-2000%20\(EN\).pdf](http://www.elvpr.ru/en/poluprovodnikprib/tiristory/TFI173-2000%20(EN).pdf).