

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО ПЕРЕГРЕВА ОБЛАСТИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ ПРИ УСЛОВИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА РАЗРЯДА RC -ШУНТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ

Н. Н. Беспалов, С. А. Зинин, А. С. Дорофеев

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,
Научно-производственное предприятие «Электронная техника – МГУ»
Тел. (834-2) 24-17-77. E-mail: eltech-mgu@mail.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются результаты моделирования электрических процессов включения силовых тиристорov и теплового нагрева кремния в области первоначального включения с учетом тока разряда RC -шунтирующей цепи.

Summary. In the report the results of modeling of electrical processes of inclusion power thyristors and thermal heating of silicon are considered in the field of initial inclusion in view of a current of the category RC of a shunting circuit.

Постановка задачи

При работе в преобразователях электрической энергии силовые тиристоры (СТ) для снижения скорости нарастания напряжения на них на этапе восстановления запиорных свойств шунтируются демпфирующими RC -цепями. Это обуславливает возникновение дополнительных электрических потерь в области первоначального включения (ОПВ) СТ на этапе включения, так как разрядный ток RC -цепи складывается с током нагрузки, скорость нарастания $(di_T/dt)_H$ которого обычно устанавливается менее критической величины $(di_T/dt)_{crit}$ для используемого типа СТ. При этом скорость нарастания тока разрядной $(di_T/dt)_P$ цепи ограничивается только паразитной индуктивностью разрядного контура и собственной индуктивностью СТ. Поэтому на этапе включения скорость нарастания тока в открытом состоянии может многократно превышать критическую величину $(di_T/dt)_{crit}$, что и обуславливает возникновение в ОПВ дополнительных локальных электрических потерь.

В тиристорной структуре (ТС) при переключении из закрытого состояния в открытое наблюдается эффект локализации включенного состояния в ОПВ, формируемой вблизи управляющего электрода (УЭ). В связи с относительно малыми размерами ППВ $S_0 = 0,5 \div 5 \text{ мм}^2$ этой области и ограниченной радиальной скоростью распространения включенного состояния ($v_r \leq 0,1 \text{ мм/мкс}$) по площади ТС во время включения при высоких значениях скорости нарастания тока di_T/dt в открытом состоянии в ОПВ возникают большие локальные электрические потери. Эти потери приводят к перегреву ОПВ и на границах разделов открытых участков p -базы и n -эмиттера и катодной металлизации возникают термически активируемые деградационные процессы, приводящие при определенных условиях к отказу СТ. Локальность включения усугубляется различного рода неконтролируемыми технологическими дефектами ТС в области УЭ. Это приводит к существенному разбросу величин ППВ ТС одного типа и, соответственно, величин энергии электрических потерь W_T и тепловых перегревов в ОПВ при равных внешних условиях включения, что обуславливает различную надежность СТ в режимах с высокими значениями di_T/dt . Статистика показывает, что около 50% всех отказов СТ в электрических преобразователях вызваны термически активируемыми эрозийными процессами в области УЭ, возникающими при ОПВ в процессе включения СТ [1].

В настоящее время в практике разработки преобразователей практически не существует методики расчета величин параметров RC -цепи, при которых обеспечиваются условия надежной работы СТ в указанных режимах. В данной работе проведены результаты моделирования электрических процессов в ОПВ СТ при включении на нагрузку с учетом разряда демпфирующей RC -цепи для оценки тепловых режимов в ОПВ и определения подходов к разработке такой методики.

Метод решения

С целью исследования влияния различных внешних и внутренних факторов на электрические и тепловые процессы в ОПВ СТ с регенеративным УЭ проведено моделирование процессов в цепи включения СТ, которая приведена на рис. 1.

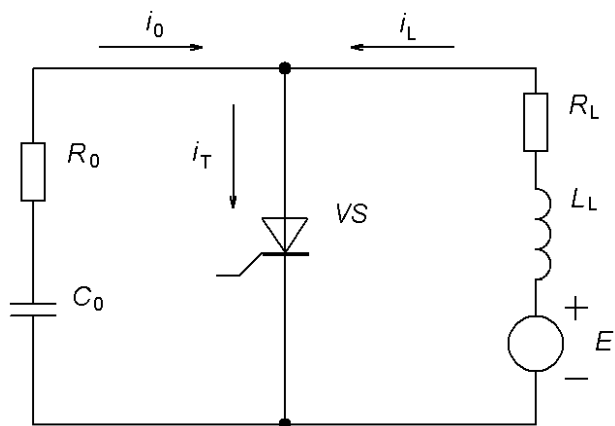


Рис. 1. Схема иллюстрирующая разряд демпфирующего защитного конденсатора C_0 и протекание токов в СТ при включении.

Рассматривался процесс включения СТ с регенеративным УЭ, имеющим вспомогательную (ВУС) и основную управляющие структуры (ОУС). Предполагалось, что в таких режимах СТ включается в ВУС в режиме высоких уровней инжекции носителей и при достижении на этапе нарастания тока в открытом состоянии дрейфовых скоростей насыщения электронов (v_{ns}) и дырок (v_{ps}).

В исходном состоянии СТ закрыт и защитный конденсатор C_0 заряжен до напряжения E . При включении СТ через него протекает ток $i_T = i_0 + i_L$. Так как рассматривается начальный этап включения СТ в интервале времени до момента включения ОУС t_k , величина которого не более 2 мкс, то представим нарастание на

этом этапе тока нагрузки с постоянной скоростью $(di/dt)_L = \frac{E}{L_L} = const$, где E – напряжение источника; L_L – индуктивность нагрузки. Тогда изменения тока нагрузки во времени можно представить в виде:

$$i_L = (di/dt)_L t. \quad (1)$$

Известно [2], что при включении $p-n-p-n$ -структуры СТ при высоких уровнях инжекции в обоих базовых слоях анодное напряжение на тиристоре для случая неизменной во времени ППВ определяется соотношением:

$$u_T = L_0 \left(\frac{di_T}{dt} + \frac{i_T}{\tau} \right), \quad (2)$$

где $L_0 = \frac{W^3}{12\epsilon\epsilon_0 v_{ns} v_{ps} S_0}$ – параметр, обратно пропорциональный ППВ и имеющий размерность индуктивности; W – суммарная толщина баз ТС; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; τ – эффективное время жизни носителей при высоких уровнях инжекции в базах; i_T – ток в открытом состоянии.

Для случаев, когда $I_0 \ll I_{Tmax}$, где I_0 – ток по достижении которого в узкой p -базе реализуется высокий уровень инжекции, и $L_0/\tau \ll R$, выражение (2) упрощается и представляется в виде:

$$u_T \approx U_{DM} e^{-\frac{t}{\tau_{BB}}}, \quad (3)$$

где $\tau_{BB} = \frac{L_0}{R_0} = \frac{W^3}{12\epsilon\epsilon_0 v_{ns} v_{ps} S_0 R_0}$ – постоянная нарастания тока через СТ при высоком уровне

инжекции в обеих базах; $U_{DM} = E$ – напряжение на СТ в закрытом состоянии.

Учитывая (2) на основании второго закона Кирхгофа для представленной разрядной цепи можно записать формулу:

$$i_0 R_0 + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_0 dt + u_T = 0. \quad (3)$$

Сделав соответствующие преобразования для практически интересных случаев, когда $L_0 / \tau \ll R_0$, получим закон изменения тока через ОПВ СТ в виде:

$$i_T = i_0 + i_L = \frac{U_{DM}}{2\xi L_0} \left(e^{k_1 t} - e^{k_2 t} \right) + (di/dt)_L t \quad (4)$$

где $k_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{2L_0} \pm \sqrt{\left(\frac{R_0}{2L_0} \right)^2 - \frac{1}{L_0 C_0}} \right)$; C_0 – емкость защитного конденсатора; R_0 –

токоограничительный резистор.

Мощность, выделяющаяся в ТС в объеме ОПВ в рассматриваемый интервал определяется как:

$$P_T = i_T \cdot u_T. \quad (5)$$

Мощность, выделяющаяся в поверхностном объеме n -эмиттера за время t_k , определяется как:

$$P_{nэ} = i_T^2 / R_{nэ}, \quad (6)$$

где $R_{nэ} = \frac{\rho_{nэ} X_0^2}{h_{nэ} S_0} (a_n - 1)$ – сопротивление поверхностного объема n -эмиттера, $\rho_{nэ}$ – удельное сопротивление поверхностного объема n -эмиттера, X_0 – максимальная ширина области первоначального включения, $h_{nэ}$ – высота поверхностного слоя n -эмиттера, S_0 – площадь первоначального включения тиристора, $a_n = L_n / X_0$, L_n – ширина открытого участка n -эмиттера.

Энергия, выделяющаяся в структуре тиристора за время t_k , определяется как:

$$W_T = \int_0^{t_k} P_T dt. \quad (7)$$

Энергия, выделяющаяся в поверхностном объеме n -эмиттера за время t_k , определяется как:

$$W_{nэ} = \int_0^{t_k} P_{nэ} dt, \quad (8)$$

где $P_{nэ}$ – мощность, выделяющаяся в поверхностном объеме n -эмиттера за время t_k .

Температура перегрева структуры тиристора за время t_k рассчитывается по формуле:

$$\Delta T_{hs} = \frac{\Delta W_T}{c \rho d S_0}, \quad (9)$$

где c – теплоемкость кремния, ρ – плотность кремния, d – толщина структуры тиристора, S_0 – площадь первоначального включения тиристора, ΔW_T – энергия, выделяющаяся за интервал времени t_k в структуре тиристора.

Температура перегрева поверхностного объема n -эмиттера за время t_k определяется как:

$$\Delta T_{nэ} = \frac{\Delta W_{nэ}}{c \rho h_{nэ} S_{эс}}, \quad (10)$$

где c – теплоемкость кремния, ρ – плотность кремния, $h_{nэ}$ – высота поверхностного слоя n -эмиттера, $S_{эс} = 2\pi(R_1 + X_0)(L_n - X_0)$ – эффективная площадь поверхностного объема n -эмиттера ВУС, R_1 – радиус p - n -перехода ВУС, $\Delta W_{nэ}$ – энергия, выделяющаяся за интервал времени t_k в поверхностном объеме n -эмиттера.

Результаты моделирования

Рассмотрим некоторые результаты моделирования электрических и тепловых процессов в ОПВ СТ. В качестве исследования была выбрана конструкция управляющей области ТС СТ типа

T453(553)-800, широко используемого в преобразователях СТ, для которого характерно последовательное формирование включенного состояния вначале в ВУС, а через время 2 мкс в ОУС.

Значения параметров демпфирующего RC-контура выбирались следующими: $C_0 = 1$ мкф, $R_0 = (10 - 100)$ Ом. Значения параметров электрического режима: $U_{DM} = 2400$ В, $(di/dt)_L = 100$ А/мкс.

На рис. 2 – 3 представлены временные зависимости тока через СТ в открытом состоянии при различных возможных значениях ППВ $S_0 = 0,5-3$ мм² и различных R_0 .

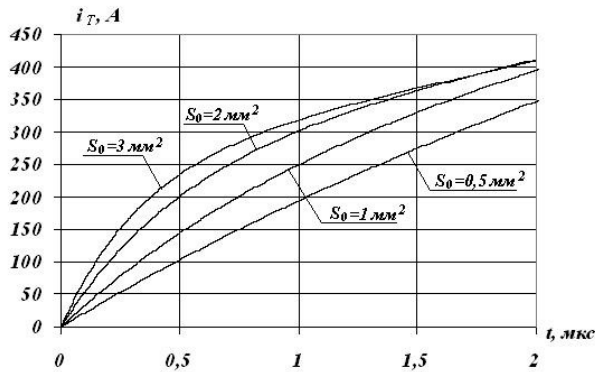


Рис. 2. Временные диаграммы тока i_T при $R_0=10$ Ом.

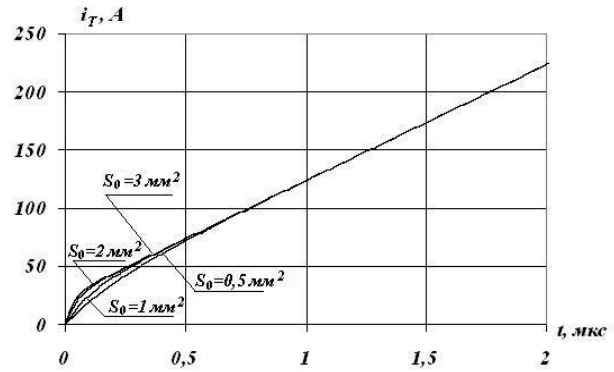


Рис. 3. Временные диаграммы тока i_T при $R_0=100$ Ом.

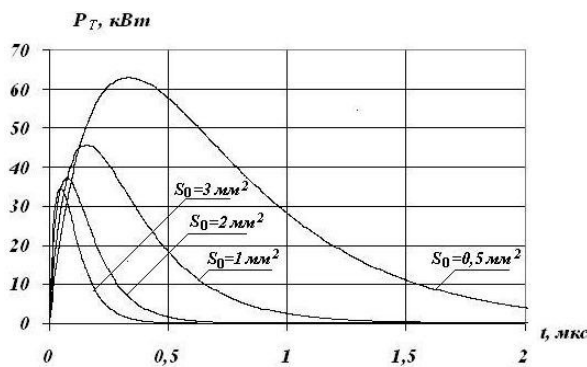


Рис. 4. Временные диаграммы мощности P_T при $R_0=10$ Ом.

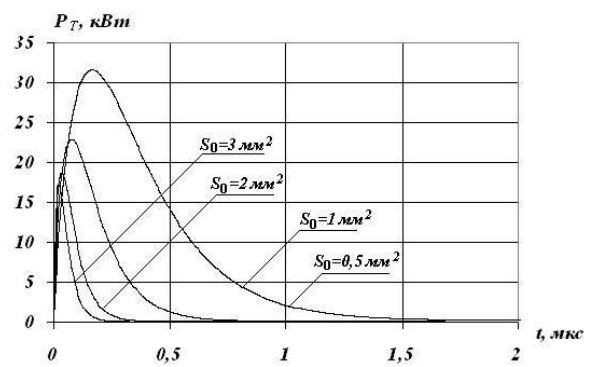


Рис. 5. Временные диаграммы мощности P_T при $R_0=100$ Ом.

На рис. 4 – 5 представлены временные зависимости мощности потерь в ТС в открытом состоянии при различных возможных значениях ППВ $S_0 = 0,5-3$ мм² и различных R_0 .

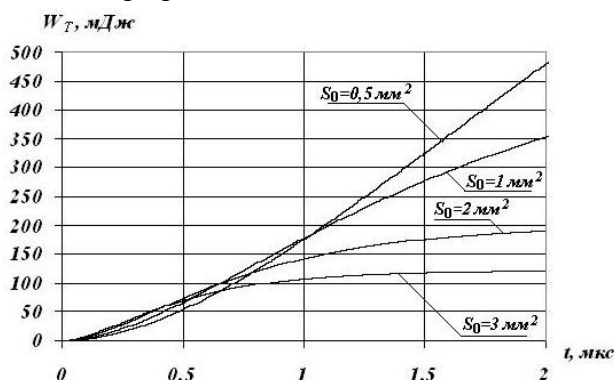


Рис. 6. Временные диаграммы энергии W_T при $R_0=10$ Ом.

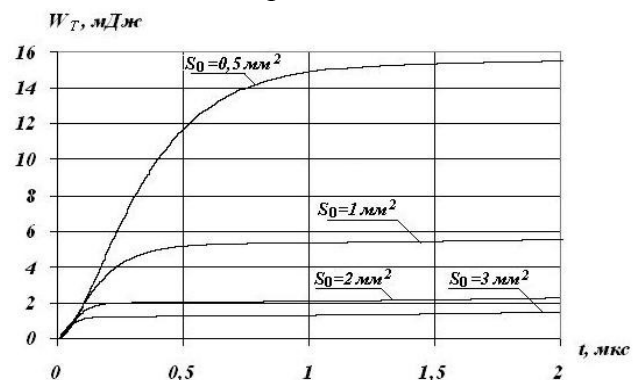


Рис. 7. Временные диаграммы энергии W_T при $R_0=100$ Ом.

На рис. 6 – 7 представлены временные зависимости энергии потерь в ТС в открытом состоянии при различных возможных значениях ППВ $S_0 = 0,5-3$ мм² и различных R_0 .

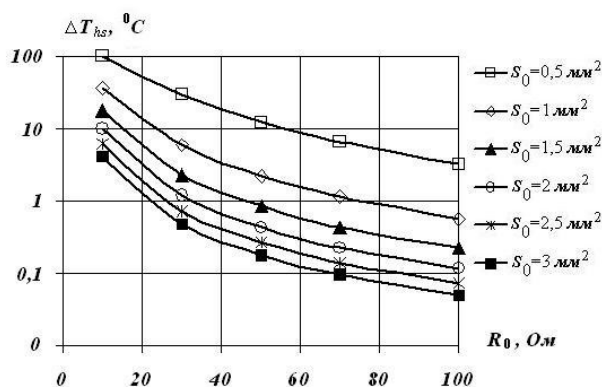


Рис. 8. Зависимости ΔT_{hs} от R_0 при различных S_0 .

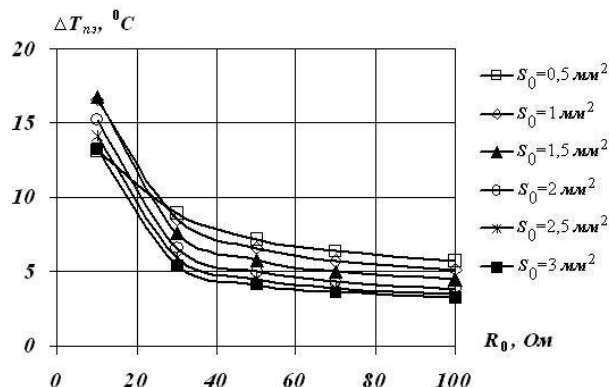


Рис. 9. Зависимости ΔT_{nz} от R_0 при различных S_0 .

На рис. 8 – 9 представлены зависимости перепадов температуры в ОПВ вдоль канала протекания тока i_T в области ограниченной размерами ПНВ и в поверхностном объеме n -эмиттера за время t_k от величины R_0 при различных возможных значениях ППВ $S_0 = 0,5–3 \text{ мм}^2$.

Из полученных данных следует, что параметры электрических переходных процессов в СТ при включении, а также тепловых перегревов в ОПВ существенно зависят от значений ППВ и параметров демпфирующей RC -цепи. Причем перепады температуры в ОПВ, определяющие надежность СТ [3-7] в режимах включения с повышенными значениями скорости нарастания тока di_T/dt в открытом состоянии тем меньше, чем больше значения ППВ S_0 и демпфирующего резистора R_0 .

Вывод

Полученные результаты свидетельствуют, что учитывая влияние на тепловой перегрев ОПВ многих факторов при разработке методики расчета величин параметров демпфирующих RC -цепей для обеспечения требуемой надежности СТ при эксплуатации в режимах включения с повышенными значениями скорости нарастания тока di_T/dt в открытом состоянии требуется учитывать конструктивные параметры УЭ СТ, величины ППВ, исходное напряжение U_{DM} на СТ в закрытом состоянии и скорость нарастания тока нагрузки $(di/dt)_L$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плоткина, Н. З., Цзин Ю. Д. Испытания силовых тиристоров на di/dt -стойкость / Н. З. Плоткина, Ю. Д. Цзин // Труды НИИПТ. – Л.: Энергоиздат. – 1981. – С. 68–74.
2. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н., Мамонов В. И., Павлик В. Я. Расчет силовых полупроводниковых приборов. / Под ред. Кузьмина В. А. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.
3. Ikeda Sh., Tsuda Sh., Waki Y. The current pulse rating of thyristors. // IEEE Trans. Electr. Dev. – 1970. – Vol 17. – № 9. – P. 690–694.
4. Piccone D. E., Somos I. Accelerated life tests for determining the life expectancy of a thyristor due to di/dt failure modes. // IEEE Conf. Rec. 7th Annu. Meet. Ind. Appl. Soc. – 1972. – P. 469–476.
5. Somos I. L. Current conditions for meaningful di/dt test. // World Electrotechn. Congress. M. – 1977 – Section 5A. – Paper 50.
6. Somos I. L. Erikson L. O., Tobin W. H. Establishing conditions for a meaningful di/dt test thyristors. // 10th Intern. PCI Conf. Proc. – 1985. – P. 113–121.
7. Веревкин В. В., Григорьев А. М., Шпер В. Л. Надежность силовых тиристоров при высоких скоростях нарастания анодного тока. // Новые силовые полупроводниковые приборы и технология их изготовления: Сб. науч. тр. – М.: Изд-во ВЭИ им. В. И. Ленина, 1991. – С. 143–157.