

# ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОЩАДИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ

Беспалов Н. Н., Зинин С. А.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,  
Научно-производственное предприятие «Электронная техника – МГУ»  
Тел. (834-2) 24-17-77. E-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru)

**Аннотация.** В докладе рассматриваются результаты исследования влияния параметров реального разрядного контура включения силовых тиристорov на погрешность определения конечного значения величины энергии потерь, выделяющейся в тиристорной структуре, при оценке площади первоначального включения.

**Ключевые слова:** силовой тиристор, площадь первоначального включения, энергия потерь,  $di/dt$ -стойкость, измерение, погрешность

## Постановка задачи

Локальный характер включения  $p-n-p-n$  структуры силового тиристора (СТ) под действием импульса тока управления и сравнительно низкая скорость распространения включенного состояния создает условия локального выделения тепла в области первоначального включения (ОПВ), формируемой вблизи управляющего электрода (УЭ). При повышенных значениях скорости нарастания тока  $di_T/dt$  в открытом состоянии превышающей некоторую критическую величину  $(di_T/dt)_{crit}$  в результате локального повышения температуры  $p-n-p-n$  структуры в ОПВ происходит ее необратимое разрушение.

Величина критической скорости нарастания тока  $(di_T/dt)_{crit}$  в открытом состоянии является важнейшим предельным параметром СТ, однако прямого метода определения  $(di_T/dt)_{crit}$  в промышленности не существует. Этот параметр только контролируется в ходе выборочных испытаний отдельных приборов. В связи с этим, в эксплуатацию попадает часть приборов с пониженной  $di_T/dt$ -стойкостью, которые обладают пониженными значениями площади первоначального включения (ППВ)  $S_0$  ОПВ [1-3].

Размеры ППВ ОПВ конкретных СТ одного типа зависят не только от геометрических размеров УЭ, но и от различных внешних и внутренних факторов, влияющих на процесс формирования включенного состояния. К первым относятся параметры тока управления: амплитуда тока  $I_{GM}$ , длительность и скорость  $di_G/dt$  его нарастания, напряжение на СТ в закрытом состоянии  $U_{DM}$ . Ко вторым относятся различные технологические нарушения и дефекты полупроводниковой структуры и металлизации в области УЭ. Технологические нарушения и дефекты определяют и величины параметров вольтамперной характеристики (ВАХ) УЭ СТ.

Для создания методики и аппаратуры сплошного контроля приборов по  $di_T/dt$ -стойкости нами разработан метод определения ППВ тиристорov [4] по параметрам переходного процесса включения в специальном испытательном режиме на активную нагрузку. Метод основан на теории процесса включения тиристорov на активную нагрузку, разработанной авторами работы [5].

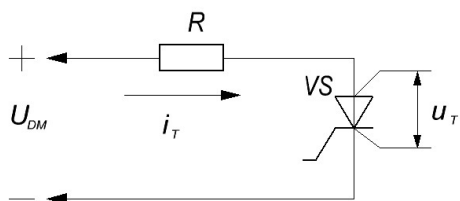


Рис. 1. Контур включения СТ на активную нагрузку.

На рис. 1 приведен контур включения СТ с идеальным источником напряжения и активным сопротивлением контура  $R$  в режиме высоких уровней инжекции носителей и при достижении на этапе нарастания тока в открытом состоянии дрейфовых скоростей насыщения электронов ( $v_{ns}$ ) и дырок ( $v_{ps}$ ) и плотностей тока свыше  $2 \text{ А/мм}^2$ .

На основе этой работы нами определена косвенная зависимость величины энергии потерь от ППВ  $S_0$  при включении, которая определяется выражением:

$$A_T = \int_0^t i_T u_T dt = I_{Tmax} U_{DM} \tau_{BB} \left[ e^{-\frac{t}{\tau_{BB}}} \left( \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{\tau_{BB}}} - 1 \right) + \frac{1}{2} \right], \quad (1)$$

где  $I_{Tmax}$  – максимальный ток в открытом состоянии,  $U_{DM}$  – напряжение на СТ в закрытом состоянии,  $\tau_{BB} = \frac{L_0}{R} = \frac{(W_n + W_p)^3}{12\epsilon\epsilon_0 v_{ns} v_{ps} S_0 R}$  – постоянная нарастания тока, зависящая от ППВ, где

$L_0 = \frac{(W_n + W_p)^3}{12\epsilon\epsilon_0 v_{ns} v_{ps} S_0}$  – параметр, обратно пропорциональный ППВ и имеющий размерность индуктивности;  $(W_n + W_p)$  – суммарная толщина баз ТС;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость кремния;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

На основе данного выражения нами предлагается вычислять величину энергии  $A_T$  выделяемую в ОПВ к определенному моменту времени  $t_k = 2$  мкс от начала протекания тока  $i_T$  в открытом состоянии. Отсчет момента времени  $t_k = 2$  мкс выбирался исходя из предположения, что к этому моменту можно пренебречь изменением ППВ во времени на этапе регенеративного роста тока и положить, что ППВ остается квазипостоянной по величине.

Авторами работы [5] рассматриваются переходные процессы в идеальном контуре включения и процесс включения СТ на активную нагрузку  $R = 2$  Ома. При этом не учитываются некоторые особенности, присущие реальным контурам включения. К таким особенностям относятся невозможность включения в реальный контур идеального источника напряжения, обеспечивающего соответствующие характеристики во время переходных процессов, и наличие паразитных индуктивностей, присутствующих как внутри элементов контура включения, так и в соединительных цепях между элементами. Между тем паразитная индуктивность  $L_{\Pi}$ , присутствующая в реальном испытательном контуре, может вносить определенную погрешность и существенно влиять на конечную величину определенной энергии потерь  $A_{T|t_k=2.мкс}$  при определенных значениях активного сопротивления контура  $R$ , а полученные таким образом данные могут быть определены с недопустимой погрешностью. В связи с этим важной задачей при определении ППВ СТ, включенного на активную нагрузку, является выбор величин параметров реального разрядного контура, при которых обеспечивается допустимая погрешность определения величины энергии потерь  $A_{T|t_k=2.мкс}$ .

### Метод решения

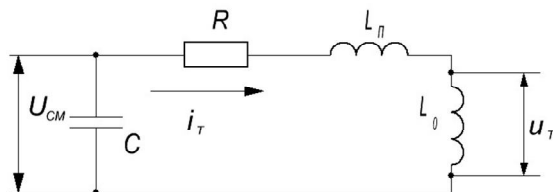


Рис. 2. Реальный контур включения СТ на активную нагрузку.

$A_{T|t_k=2.мкс}$ . Вместо идеального источника бесконечной емкости в модели разрядного контура включения СТ используется конденсатор  $C$ .

Решение дифференциального уравнения для реального разрядного контура включения (рис. 2) позволяет определить выражение для энергии потерь  $A'_{T|t_k=2.мкс}$  в реальном контуре, содержащем паразитную индуктивность, которая будет определяться выражением:

С целью определения погрешности, вносимой паразитной индуктивностью  $L_{\Pi}$ , при определении энергии локальных потерь в ТС проведено моделирование процессов в контуре включения СТ, которая приведена на рис. 2. Реальный контур включения СТ содержит в себе паразитную индуктивность  $L_{\Pi}$ , которая вносит свою погрешность при определении величины энергии потерь

$$A'_{T|t_k=2\text{мкс}} = \int_0^{t_k} p(t)dt = \int_0^{t_k} u_T \cdot i_T(t)dt = \frac{U^2_{CM} L_0}{8\xi^2 (L_{II} + L_0)^2} e^{-2\delta t} (e^{2\xi t_k} + e^{-2\xi t_k} - 2), \quad (2)$$

где  $\xi = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ ,  $\delta = \frac{R}{2(L_{II} + L_0)}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{(L_{II} + L_0)C}}$ .

В результате определения величин энергии потерь в ОПВ ТС при включении в идеальном разрядном контуре (1) и включении в реальном контуре (2), содержащем паразитную индуктивность  $L_{II}$ , можно оценить погрешность, вносимую паразитной индуктивностью контура, которая определится как:

$$\delta = \frac{|A_{T|t_k=2\text{мкс}} - A'_{T|t_k=2\text{мкс}}|}{A_{T|t_k=2\text{мкс}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

### Результаты моделирования

Рассмотрим некоторые результаты моделирования по определению величины погрешности  $\delta$ . При моделировании использовались параметры тиристорных высоковольтных структур T453(553)-800 при высоком уровне инжекции:  $W_n=400$  мкм,  $W_p=100$  мкм,  $J_a=2-5$  А/мм<sup>2</sup>.  $v_{ns}=1,1 \cdot 10^7$  см/с,  $v_{ps}=9,5 \cdot 10^6$  см/с,  $\epsilon\epsilon_0=10^{-12}$  Ф/см. Величина ППВ задавалась в диапазоне (0,5÷10) мм<sup>2</sup> [2, 3]. Расчет проводился при максимальном напряжении на конденсаторе  $U_{CM}=1000$  В, емкости конденсатора  $C=100$  мкФ, сопротивлениях резистора  $R=(1-30)$  Ом и паразитной индуктивности  $L_{II}=(0,01-10)$  мкГн.

На рис. 3 – 6 представлены зависимости погрешности определения величины энергии потерь  $\delta=f(L_{II})$  в реальном контуре при различных возможных значениях ППВ и различных сопротивлениях  $R$  и паразитных индуктивностях  $L_{II}$ .

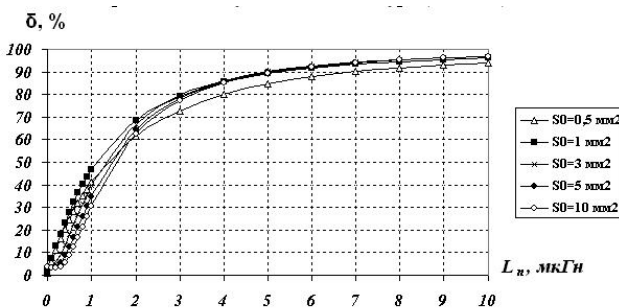


Рис. 3. Зависимость  $\delta=f(L_{II})$  при  $R=1$  Ом.

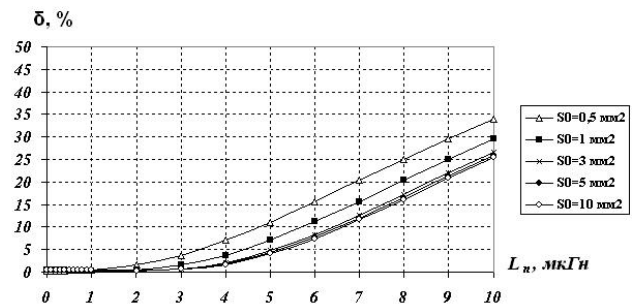


Рис. 4. Зависимость  $\delta=f(L_{II})$  при  $R=10$  Ом.

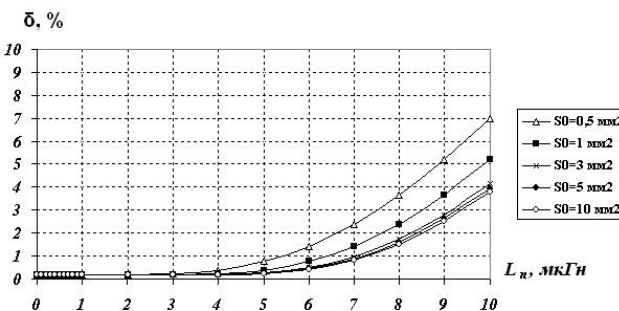


Рис. 5. Зависимость  $\delta=f(L_{II})$  при  $R=20$

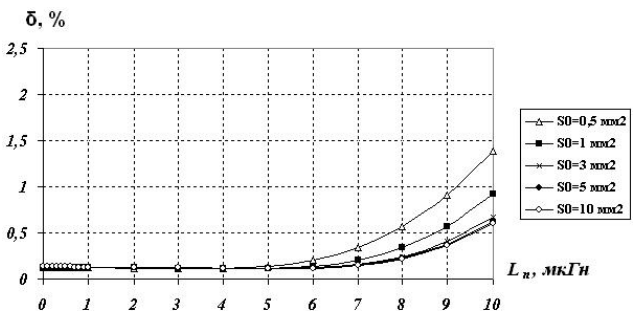


Рис. 6. Зависимость  $\delta=f(L_{II})$  при  $R=30$  Ом.

Из полученных данных следует, что влияние паразитной индуктивности  $L_{II}$ , присутствующей в реальных контурах включения СТ и определяющей погрешность измерения величины энергии потерь в ТС, тем меньше, чем больше значения ППВ  $S_0$  и резистора  $R$ . С нашей точки зрения есть два варианта учета паразитной индуктивности  $L_{II}$ : непосредственное измерение этой индуктивности и последующий учет при вычислении

$A_{T|t_k=2.мкс}$ , либо установление допустимого значения погрешности определения  $A_{T|t_k=2.мкс}$  вариацией значений активного сопротивления  $R$ .

Задавшись допустимой погрешностью  $\delta = 1\%$ , проанализируем полученные графики. При малых активных сопротивлениях (рис. 3-4)  $R = 1\text{ Ом}$  и  $R = 10\text{ Ом}$  указанная погрешность определения величины  $A_{T|t_k=2.мкс}$  для всего диапазона ППВ ( $S_0 = (0,5 - 10)\text{ мм}^2$ ) будет выполняться при значениях  $L_{\Pi} < 0,1\text{ мкГн}$  и  $L_{\Pi} < 1\text{ мкГн}$  соответственно. При более высоких значениях (рис. 5) активного сопротивления  $R = 20\text{ Ом}$  указанная погрешность наблюдается уже при значениях паразитной индуктивности  $L_{\Pi} < 5\text{ мкГн}$ . Для случая наибольшего активного сопротивления (рис. 6)  $R = 30\text{ Ом}$  указанная погрешность гарантируется при значениях паразитной индуктивности практически всего диапазона  $L_{\Pi} < 10\text{ мкГн}$ , кроме варианта прибора с  $S_0 = 0,5\text{ мм}^2$ , у которого погрешность определения величины энергии потерь больше допустимого значения.

Обобщая результаты моделирования, можно сказать, что при относительно высоких значениях активной нагрузки  $R > 30\text{ Ом}$  погрешность, вносимая паразитной индуктивностью  $L_{\Pi}$  при определении величины энергии потерь  $A_{T|t_k=2.мкс}$ , будет меньше 1%, а конечная величина  $A_{T|t_k=2.мкс}$  будет определена с достаточной точностью практически во всем диапазоне значений  $L_{\Pi}$ . При более низких значениях сопротивления  $R$  необходимая погрешность может быть гарантирована только до определенных значений паразитной индуктивности  $L_{\Pi}$ , причем уменьшение активного сопротивления реального испытательного контура  $R$  ведет к значительному росту погрешности  $\delta$ . При значении активного сопротивления  $R = 1\text{ Ом}$ , близком к режиму включения СТ, описанному авторами [5], погрешность определения величины  $A_{T|t_k=2.мкс}$  становится существенно выше 1%, что в конечном итоге приведет к неверному определению величины ППВ  $S_0$ .

### Вывод

Полученные результаты свидетельствуют, что при разработке методики и аппаратуры по определению ППВ  $S_0$  с минимальной погрешностью, если неизвестна величина паразитной индуктивности  $L_{\Pi}$ , необходимо выбрать величину активного сопротивления  $R$  разрядного контура свыше 30 Ом. Это обеспечит величину требуемой погрешности определения  $A_{T|t_k=2.мкс}$  не более 1%, что позволит более точно определять величины ППВ СТ, по которым возможно оценивать их  $di_T/dt$ -стойкость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов Н. Н. Выбор информативных параметров для определения площади первоначального включения силовых тиристорov / Н. Н. Беспалов, Ю. М. Голембиовский, В. В. Пузанов // Электротехнические комплексы и силовая электроника, анализ, синтез и управление. (Межвузовский научный сборник трудов). Саратов, СГТУ – 20003. – С. 4–9.
2. Беспалов Н. Н. Исследование площади начального включения силовых тиристорov. // Полупроводниковые приборы и преобразовательные устройства: Современные направления исследования и конструирования: Межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 1988. – С. 49–56.
3. Беспалов Н. Н., Гейфман Е. М. Экспериментальное исследование площади начального включения и потерь в тиристорах при включении по цепи управления. // Электротехника. – 1995. – № 1. – С. 48–51.
4. Беспалов Н. Н., Зинин С. А. Устройство для определения параметров тиристорov при включении. // Материалы XIII научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов МГУ имени Н. П. Огарева. Ч. 2. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2008. – С. 254–258.
5. 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.