

# Коммутационные параметры силовых полупроводниковых приборов,

## характеризующие их переключение из проводящего в непроводящее состояние

**Рассмотрены коммутационные параметры, характеризующие переключение силовых полупроводниковых приборов из проводящего состояния в непроводящее (их выключение) под действием импульса обратного напряжения. Предложена математическая модель, описывающая зависимость этих параметров от силы прямого тока и скорости его спада перед выключением. Описаны разработанные на основе экспериментальных данных алгоритмы восстановления указанной зависимости.**

**Сергей Матюхин,**  
д. ф. – м. н.

sim1@mail.ru

**Александр Ставцев**

A.Stavtsev@proton-electrotex.com

Коммутационные параметры относятся к важнейшим характеристикам силовых полупроводниковых приборов (СПП), поскольку от них в значительной мере зависят динамические свойства и нагрузочная способность приборов, КПД и условия их охлаждения. В настоящей работе рассмотрены коммутационные параметры, характеризующие переключение СПП из проводящего состояния в непроводящее (выключение СПП) под действием импульса обратного напряжения.

Как известно [1–3], в закрытое состояние силовые приборы (диоды, тиристоры) переходят за конечное время  $t_{rr}$ , необходимое для удаления избыточного заряда  $Q_{rr}$  накопленного при их работе в проводящем состоянии. При этом переходный процесс выключения СПП состоит из двух основных этапов (рис. 1): этапа нарастания обратного тока и этапа спада обратного тока в результате восстановления обратного сопротивления.

На первом этапе полупроводниковая структура СПП практически не блокирует напряжения, так как в ее слоях имеется достаточно большое число избыточных носителей заряда. Поэтому под действием импульса обратного напряжения через СПП начинает протекать обратный ток, который линейно нарастает до своего максимального значения  $I_{rr}$ , со скоростью  $di/dt$ , определяемой приложенным напряжением и параметрами внешней электрической цепи:

$$i(t) = -(di/dt)t. \tag{1}$$

Длительность этого этапа равна  $t_s$  (рис. 1). Таким образом:

$$I_{rr} = (di/dt)t_s. \tag{2}$$

Протекание обратного тока через структуру способствует уменьшению концентрации избы-

точных носителей, во-первых, за счет процессов рекомбинации, во-вторых, за счет выноса их внешним электрическим полем. В момент времени  $t_s$  накопленный заряд уменьшается настолько, что начинает ограничивать обратный ток. При этом сопротивление прибора резко возрастает, и он принимает на себя внешнее напряжение. С этого момента с уменьшением концентрации избыточных носителей заряда обратный ток через тиристор резко убывает от своего максимального значения  $I_{rr}$  практически до нуля [2]:

$$i(t) \approx -I_{rr} \exp\left(-\frac{t-t_s}{0,53 t_f}\right), \tag{3}$$

где  $t_f$  — это время, которое принято рассматривать в качестве длительности этапа восстановления обратного сопротивления (рис. 1).

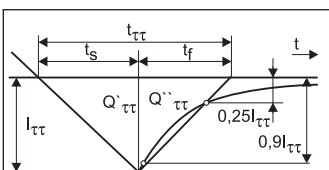
Длительность всего переходного процесса выключения СПП:

$$t_{rr} \approx t_s + t_f \tag{4}$$

При этом избыточный заряд, накопленный при работе СПП в проводящем состоянии (рис. 1), определяется как:

$$Q_{rr} \approx Q_{rr}' + Q_{rr}'' = 0,5 I_{rr} t_{rr} = 0,5 \times di/dt \times t_s (t_s + t_f). \tag{5}$$

В настоящей работе предложена математическая модель, описывающая наблюдаемую на опыте зависимость коммутационных параметров  $t_s$ ,  $t_f$ ,  $t_{rr}$ ,  $I_{rr}$  и  $Q_{rr}$  от силы прямого тока и скорости его спада перед выключением прибора. Разработаны алгоритмы восстановления этой зависимости по экспериментальным данным.



**Рис. 1.** Эюра обратного тока, протекающего через СПП при его переключении из проводящего в непроводящее состояние

**Математическая модель, описывающая зависимость коммутационных параметров СПП от силы прямого тока и скорости его спада перед выключением**

В настоящее время для описания зависимости коммутационных параметров от силы прямого тока  $I$  и скорости его спада  $di/dt$  используются степенные аппроксимации вида [2, 4]:

$$y(I) = \sum_m a_m I^m, \quad (6)$$

$$y(di/dt) = \sum_n b_n (di/dt)^n, \quad (7)$$

где  $y$  — один из коммутационных параметров ( $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ ,  $t_{rr}$ ,  $t_s$  или  $t_f$ ). При этом коэффициенты  $a_m$  и  $b_n$  и показатели степени  $m$  и  $n$  считаются постоянными ( $m, n = 1, 2, 3, \dots$ ) и подбираются из условия наилучшего совпадения кривых (6) и (7) с экспериментальными данными.

Таким образом, выражение (6) описывает зависимость коммутационных параметров СПП от силы  $I$  прямого тока только при одном, заранее определенном значении скорости  $di/dt$  его спада, а выражение (7) задает зависимость этих параметров от скорости  $di/dt$  только при одном значении  $I$  силы прямого тока. При изменении этих значений процедуру подбора, по крайней мере, коэффициентов  $a_m$  и  $b_n$ , требуется повторять заново, для чего нужно использовать новые экспериментальные данные.

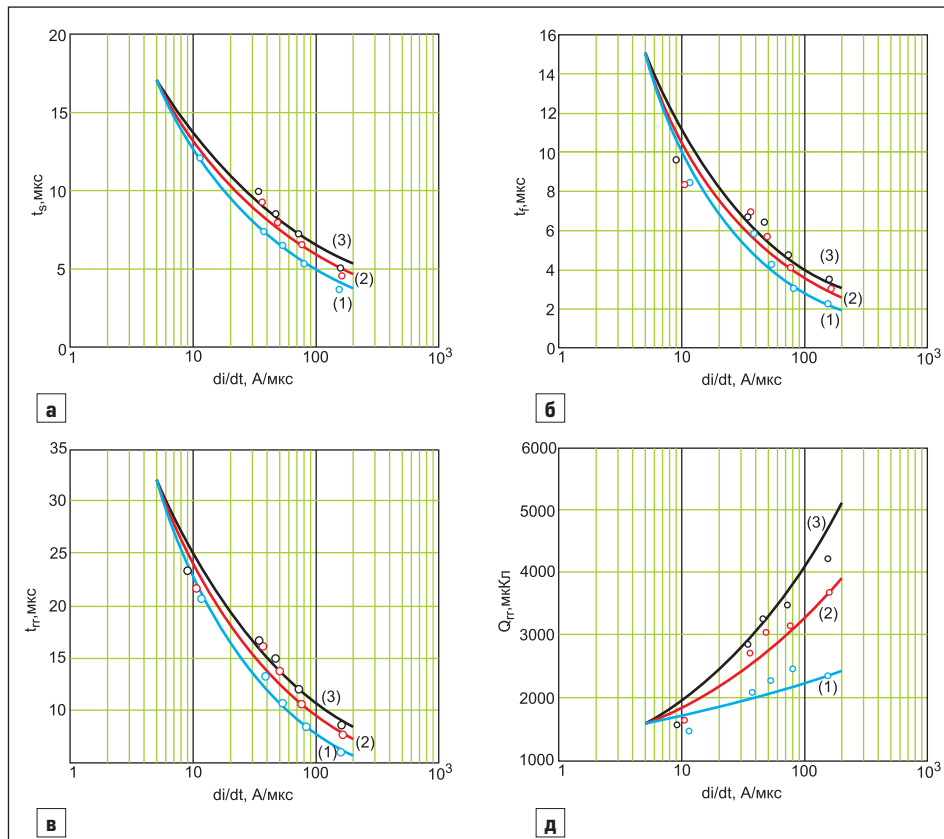
В этом заключается главный недостаток степенных аппроксимаций (6) и (7). Кроме того, эти выражения не учитывают зависимости коммутационных параметров приборов от температуры  $T_j$  полупроводниковой структуры, которая объясняется ярко выраженной зависимостью времени жизни  $\tau_p$  неосновных носителей заряда в  $n$ -базе СПП [1]:  $\tau_p \sim T_j^{3/2}$ .

Наши исследования показали, что для широкого класса приборов время нарастания обратного тока  $t_s$  и время его спада  $t_f$  определяются формулами:

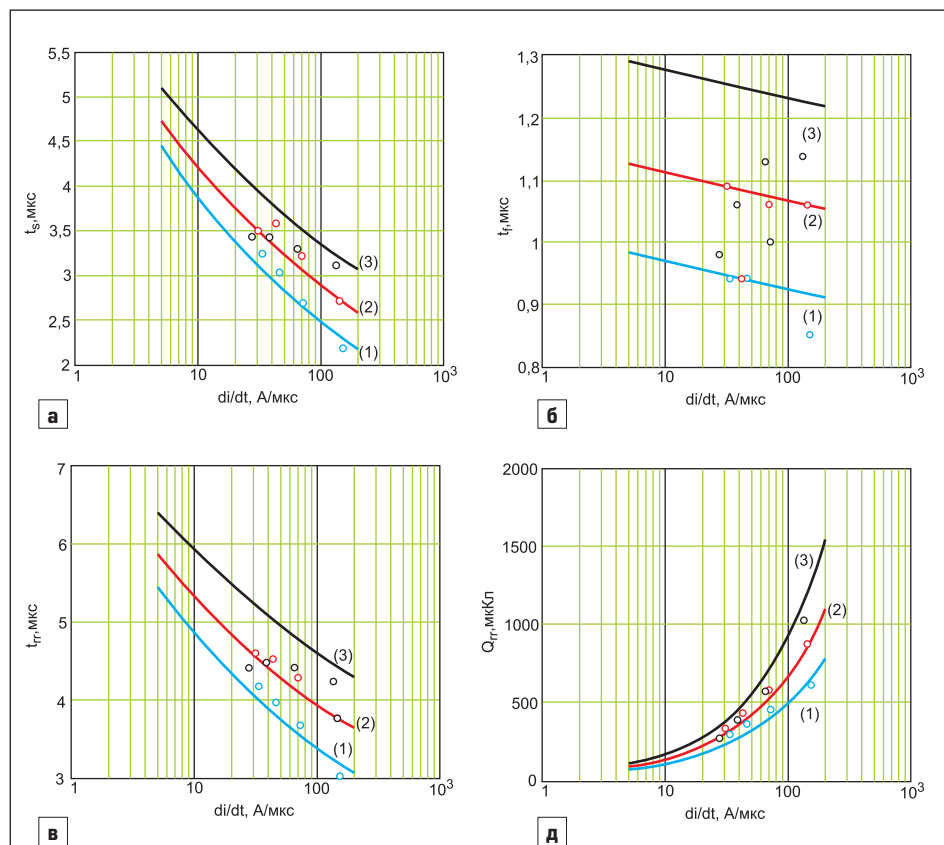
$$t_s(I, di/dt, T_j) = t_{s0} \left( \frac{I}{I_0} \right)^\alpha \left( \frac{(di/dt)_0}{di/dt} \right)^{\beta I^{-0.25}} \left( \frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

$$t_f(I, di/dt, T_j) = t_{f0} \left( \frac{I}{I_0} \right)^\gamma \left( \frac{(di/dt)_0}{di/dt} \right)^{\delta I^{-0.2}} \left( \frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{3/2}, \quad (9)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\delta$  — экспериментально определяемые параметры модели, которые зависят только от конструктивных особенностей СПП, а  $t_{s0}$  и  $t_{f0}$  — соответственно времена нарастания и спада обратного тока, измеренные при температуре  $T_{j0}$  полупроводниковой структуры, при значении  $I_0$  классификационного тока, который спадает со скоростью  $(di/dt)_0$  при переключении СПП из проводящего в непроводящее состояние.



**Рис. 2.** Коммутационные параметры тиристора МТ3-500 в зависимости от скорости  $di/dt$  спада прямого тока: а)  $t_s$ ; б)  $t_f$ ; в)  $t_{rr}$ ; г)  $Q_{rr}$  (1 —  $I = 500$  А, 2 —  $I = 1000$  А, 3 —  $I = 1500$  А; сплошные кривые — расчеты с использованием эмпирических формул (8) и (9), маркеры — экспериментальные данные, полученные при температуре  $T_j = 298$  К)



**Рис. 3.** Коммутационные параметры тиристора ТБИ173 в зависимости от скорости  $di/dt$  спада прямого тока: а)  $t_s$ ; б)  $t_f$ ; в)  $t_{rr}$ ; г)  $Q_{rr}$  (1 —  $I = 500$  А, 2 —  $I = 1000$  А, 3 —  $I = 2000$  А; сплошные кривые — расчеты с использованием эмпирических формул (8) и (9), маркеры — экспериментальные данные, полученные при температуре  $T_j = 298$  К)

Функции (8) и (9) являются естественным обобщением выражений (6) и (7) и удовлетворительно описывают полученные нами экспериментальные данные (рис. 2–4). При этом, учитывая равенства (1–5), следует сделать вывод, что формулы (8) и (9) полностью определяют все коммутационные параметры, характеризующие переходные процессы переключения СПП из проводящего состояния в непроводящее.

**Экспериментальное измерение коммутационных параметров СПП и восстановление их зависимости от силы прямого тока и скорости его спада перед выключением**

Выражения (8) и (9) совместно с равенствами (1–5) позволяют по небольшому числу экспериментальных точек восстановить зависимости всех коммутационных параметров от силы и скорости спада прямого тока. Причем, в отличие от (6) и (7), эти зависимости оказываются справедливыми при любых значениях силы тока  $I$  и скорости его спада  $di/dt$ .

Действительно, допустим, что нам удалось измерить время нарастания обратного тока  $t_{s1}(I_1)$  и время его спада  $t_{f1}(I_1)$  при температуре полупроводниковой структуры  $T_{j1}$ , при силе прямого тока  $I_1$  и скорости его спада  $(di_1/dt)_1$ . Пусть измеренные значения  $t_{s2}(I_1)$  и  $t_{f2}(I_1)$  соответствуют температуре  $T_{j1}$  при силе прямого тока  $I_1$  и скорости его спада  $(di_1/dt)_2$ , значения  $t_{s1}(I_2)$  и  $t_{f1}(I_2)$  — температуре  $T_{j2}$  при силе прямого тока  $I_2$  и скорости его спада  $(di_2/dt)_1$ , а  $t_{s2}(I_2)$  и  $t_{f2}(I_2)$  — температуре  $T_{j2}$  при силе тока  $I_2$  и скорости его спада  $(di_2/dt)_2$ . Тогда, как следует из (8) и (9),

$$t_s(I, di/dt, T_j) = t_{s1}(I_1) \left(\frac{I}{I_1}\right)^\alpha \left(\frac{(di_1/dt)_1}{di/dt}\right)^{\beta I_1^{-0.25}} \left(\frac{T_j}{T_{j1}}\right)^{3/2}, \quad (10)$$

$$t_f(I, di/dt, T_j) = t_{f1}(I_1) \left(\frac{I}{I_1}\right)^\gamma \left(\frac{(di_1/dt)_1}{di/dt}\right)^{\delta I_1^{-0.2}} \left(\frac{T_j}{T_{j1}}\right)^{3/2}, \quad (11)$$

где постоянные  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  определяются выражениями: (12), (13), (14), (15).

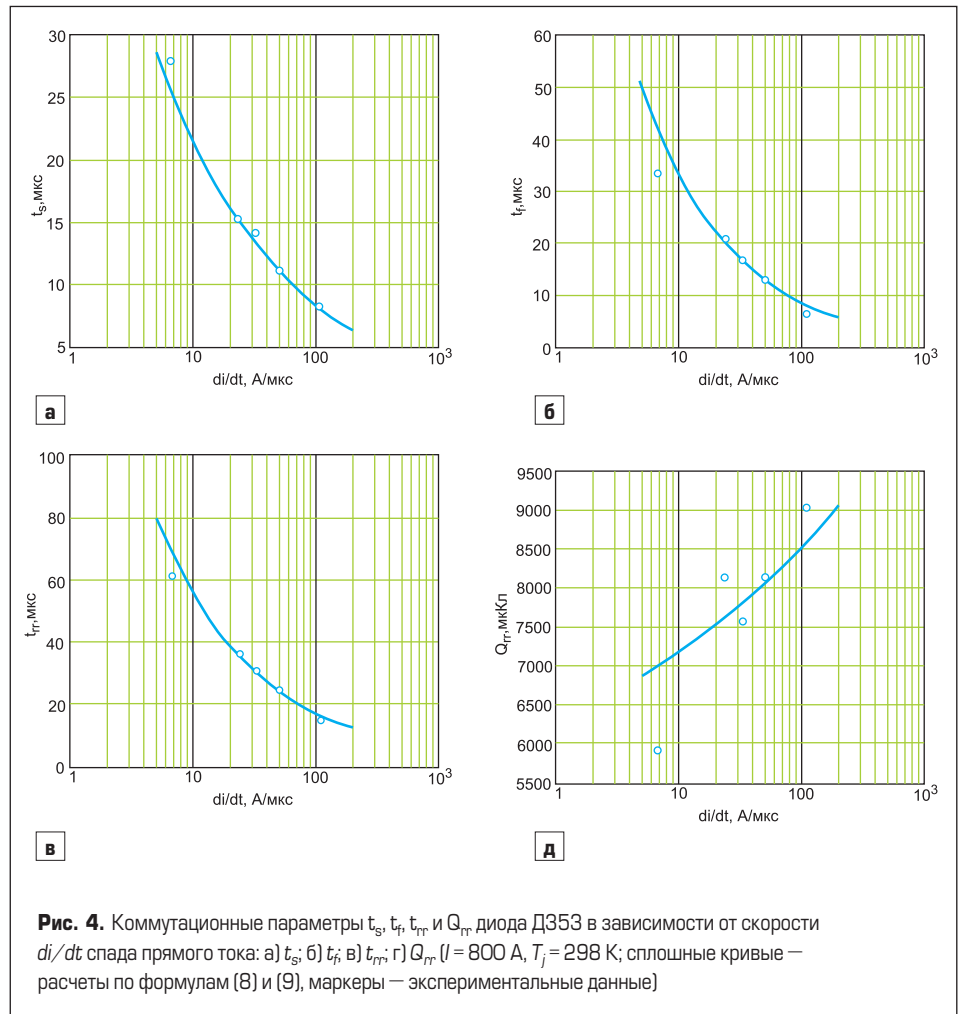
Выражение (4) позволяет определить длительность  $t_{rr}(I, di/dt, T_j)$  переходного процесса выключения СПП. По формулам (2) и (5) мо-

$$\alpha = \ln \left( \frac{t_{s1}(I_1) \left[ \frac{(di_1/dt)_1}{(di_2/dt)_1} \right]^{\beta I_1^{-0.25}} \left( \frac{T_{j2}}{T_{j1}} \right)^{3/2}}{t_{s1}(I_2) \left[ \frac{(di_1/dt)_1}{(di_2/dt)_1} \right]^{\beta I_1^{-0.25}} \left( \frac{T_{j1}}{T_{j1}} \right)^{3/2}} \right) / \ln \left( \frac{I_1}{I_2} \right), \quad (12)$$

$$\beta = \frac{1}{I_1} \left[ \ln \left( \frac{(di_1/dt)_1}{(di_1/dt)_2} \right) / \ln \left( \frac{t_{s2}(I_1)}{t_{s1}(I_1)} \right) \right]^4, \quad (13)$$

$$\gamma = \ln \left( \frac{t_{f1}(I_1) \left[ \frac{(di_1/dt)_1}{(di_2/dt)_1} \right]^{\delta I_1^{-0.2}} \left( \frac{T_{j2}}{T_{j1}} \right)^{3/2}}{t_{f1}(I_2) \left[ \frac{(di_1/dt)_1}{(di_2/dt)_1} \right]^{\delta I_1^{-0.2}} \left( \frac{T_{j1}}{T_{j1}} \right)^{3/2}} \right) / \ln \left( \frac{I_1}{I_2} \right), \quad (14)$$

$$\delta = \frac{1}{I_1} \left[ \ln \left( \frac{(di_1/dt)_1}{(di_1/dt)_2} \right) / \ln \left( \frac{t_{f2}(I_1)}{t_{f1}(I_1)} \right) \right]^5. \quad (15)$$



**Рис. 4.** Коммутационные параметры  $t_s$ ,  $t_f$ ,  $t_{rr}$  и  $Q_{rr}$  диода Д353 в зависимости от скорости  $di/dt$  спада прямого тока: а)  $t_s$ ; б)  $t_f$ ; в)  $t_{rr}$ ; г)  $Q_{rr}$  ( $I = 800$  А,  $T_j = 298$  К; сплошные кривые — расчеты по формулам (8) и (9), маркеры — экспериментальные данные)

гут быть рассчитаны максимальное значение обратного тока  $I_{rr}(I, di/dt, T_j)$  и избыточный заряд  $Q_{rr}(I, di/dt, T_j)$ , накопленный при работе СПП в проводящем состоянии.

Таким образом, по результатам шести измерений могут быть восстановлены зависимости от тока  $I$  и скорости его спада  $di/dt$  всех коммутационных параметров, характеризующих переключение СПП из проводящего состояния в непроводящее.

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что при заданной скорости нарастания обратного тока длительности  $t_s$  и  $t_f$  основных этапов выключения полупроводниковых приборов полностью определяют все остальные коммутационные параметры, характеризующие переключение СПП из проводящего в непроводящее состояние. Предлагаемая математическая модель (8, 9), описывающая зависимость  $t_s$  и  $t_f$  от силы прямого тока и скорости его спада перед выключением, позволяет по экспериментальным

данным восстановить аналогичные зависимости для любых других коммутационных параметров СПП.

Указанные зависимости справедливы при любых значениях силы прямого тока и скорости его спада перед выключением и находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом (рис. 2–4).

**Литература**

1. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. М.: Энергоиздат. 1981.
2. Абрамович М. И., Бабайлов В. М., Либер В. Е. и др. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. М.: Энергоатомиздат. 1992.
3. Рабинерсон А. А., Ашкинази Г. А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1976.
4. Westcode. Positive development in power electronics. Westcode Semiconductors Ltd. Provisional Data Sheet. 2000.