

УДК 621.3.049.77

## РАСЧЕТ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В БЫСТРО ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДАХ

Падеров В.П., Шестеркина А.А., Тундыков А.С., Симкин А.В.  
 ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск  
 тел.(8342)290625, E-mail: [paderov@mail.ru](mailto:paderov@mail.ru)

**Аннотация.** Выведены расчетные соотношения для определения коммутационных потерь в диодах при переключениях по основным параметрам режимов переключения.

**Ключевые слова:** диод, переключение, коммутационные потери, формула, параметр.

Коммутационные потери в быстро восстанавливающихся диодах (БВД) возникают, в основном, при переключении диода из прямого смещения в обратное. Осциллограммы токов и напряжений в таком режиме показаны на рисунке 1 [1].

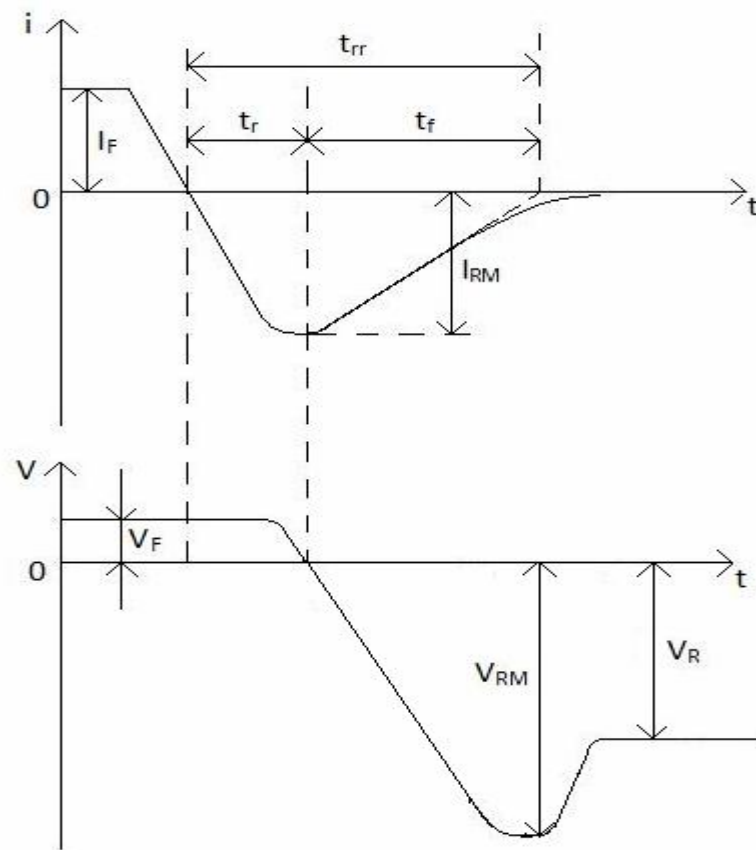


Рисунок 1 – Осциллограммы обратного тока и напряжения на БВД при переключении из проводящего состояния в закрытое

Обозначения, сделанные на рис.1:  $I_F$ ;  $V_F$  – прямой ток и прямое падение напряжения на диоде;  $I_{RM}$  – пиковая величина тока обратного восстановления;  $V_{RM}$  – пиковое обратное напряжение, обусловленное паразитной индуктивностью;  $V_R$  – обратное напряжение на диоде;  $t_{rr}$  – время восстановления;  $t_r$  – время нарастания обратного тока;  $t_f$  – время спада обратного тока.

Как видно из осциллограмм и физических процессов при переключении [1], обратное напряжение на диоде начинает нарастать, когда обратный ток достигает приблизительно своего пикового значения. Следовательно, мощность коммутационных потерь выделяется, в основном, в течение времени спада обратного тока  $t_f$ . Ее можно рассчитать по соотношению:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)v(t)dt \approx f \int_0^{t_f} i(t)v(t)dt, \quad (1)$$

где  $T = \frac{1}{f}$  – период переключений,  $f$  – частота переключений. За ноль отсчета в соотношении

(1) принят момент достижения обратным током пикового значения.

Мощность коммутационных потерь, выделяемую в БВД, можно аналитически рассчитать, если задаться аналитической формой токов и напряжений на участке спада обратного тока, то есть на участке  $t_f$ . В самом простом случае зададимся линейными формами спада тока и роста обратного напряжения:

$$i(t) = -I_{RM} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \quad (2)$$

$$v(t) = -V_{RM} \frac{t}{t_f} \quad (3)$$

Осциллограммы линейного спада тока, линейного роста обратного напряжения и мгновенной мощности потерь показаны на рисунке 2.

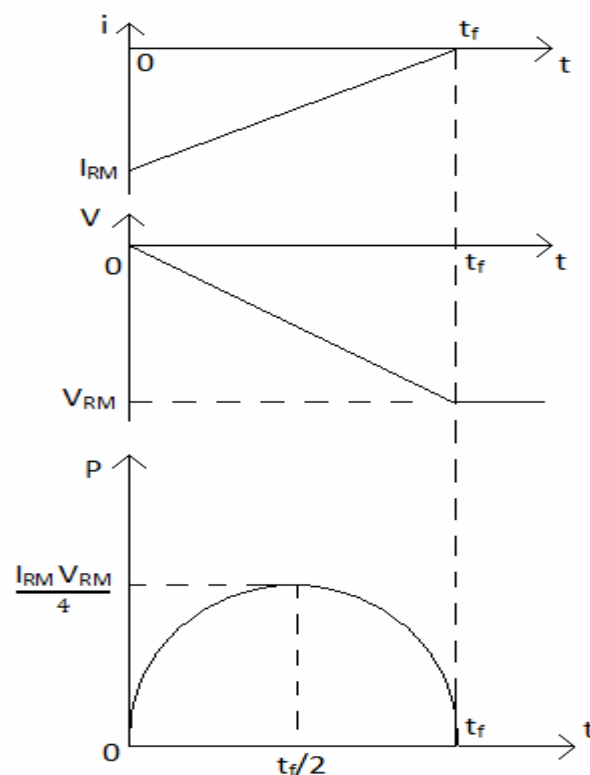


Рисунок 2 – Осциллограммы токов, напряжений и мгновенной мощности, выделяемой в БВД

Мгновенная мощность, выделяемая в БВД, есть

$$P(t) = i(t)v(t) \quad (4)$$

Подставив (2) и (3) в (4), получим:

$$P(t) = \frac{I_{RM}V_{RM}}{t_f} \left( t - \frac{t^2}{t_f} \right) \quad (5)$$

При подстановке (5) в (1) получим мощность коммутационных потерь:

$$P_d = \frac{I_{RM}V_{RM}t_f}{6} f \quad (6)$$

Из (6) следует, что мощность коммутационных потерь, выделяемая на БВД, прямо пропорциональна пиковым значениям тока и напряжения, частоте переключений и длительности спада обратного тока.

Мгновенная мощность максимальна, когда  $\frac{dP}{dt} = 0$ . Дифференцируя (5), получим:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{I_{RM}V_{RM}}{t_f} \left( 1 - \frac{2t}{t_f} \right) \quad (7)$$

Приравняв (7) к нулю, получим:

$$t(P_{max}) = \frac{t_f}{2} \quad (8)$$

$$P_{max} = \frac{I_{RM}V_{RM}}{4} \quad (9)$$

Аналогичные расчеты можно провести, задавшись иной формой изменения обратного тока и напряжения. Например, ток спадает по квадратичному закону, а напряжение нарастает по линейному.

$$i(t) = -I_{RM} \left( 1 - \frac{t^2}{t_f^2} \right) \quad (10)$$

Подстановка (3) и (10) в (4) дает:

$$P(t) = \frac{I_{RM}V_{RM}}{t_f} \left( t - \frac{t^3}{t_f^2} \right) \quad (11)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{I_{RM}V_{RM}}{t_f} \left( 1 - \frac{3t^2}{t_f^2} \right) \quad (12)$$

Из условия  $\frac{dP}{dt} = 0$  получаем:

$$t(P_{max}) = \frac{t_f}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$P_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} I_{RM} V_{RM} \approx 0,385 I_{RM} V_{RM} \quad (14)$$

При подстановке (11) в (1) получаем мощность коммутационных потерь:

$$P_d = \frac{I_{RM} V_{RM} t_f}{4} f \quad (15)$$

Из сравнения выражений (6) и (15) следует, что мощность коммутационных потерь имеет аналогичную зависимость от параметров, но возрастает по сравнению с линейным изменением тока в 1,5 раза.

При квадратичном спаде обратного тока и квадратичном росте обратного напряжения, описываемого уравнением

$$V(t) = \frac{V_m}{t_f^2} (t - t_f)^2 - V_m = \frac{V_m}{t_f} \left( \frac{t^2}{t_f} - 2t \right), \quad (16)$$

получаем мгновенную мощность:

$$P(t) = \frac{I_{RM} V_{RM}}{t_f} \left( 2t - \frac{t^2}{t_f} - \frac{2t^3}{t_f^2} + \frac{t^4}{t_f^3} \right) \quad (17)$$

Дифференцируя (17), получим

$$\frac{dP}{dt} = \frac{I_{RM} V_{RM}}{t_f} \left( 2 - \frac{2t}{t_f} - \frac{6t^2}{t_f^2} + \frac{4t^3}{t_f^3} \right) \quad (18)$$

Приравняв (18) к нулю, рассчитаем время, при котором достигается максимальное значение мгновенной мощности и величину этой максимальной мощности. Если ввести обозначение  $x = \frac{t}{t_f}$ , то уравнение (18) примет вид:

$$4x^3 - 6x^2 - 2x + 2 = 0 \quad (19)$$

Уравнение (19) можно упростить подстановкой: если заменить  $x$  на  $x = y - \frac{b}{3a}$  [2], где  $a$  – множитель при кубическом члене,  $b$  – множитель при квадратичном члене, то коэффициент при квадратичном члене обнулится

$$4(y + 0,5)^3 - 6(y + 0,5)^2 - 2(y + 0,5) + 2 = 4y^3 - 5y = 0 \quad (20)$$

Уравнение (20) имеет три корня:  $y_1 = 0$ ,  $y_2 = \frac{\sqrt{5}}{2}$ ,  $y_3 = -\frac{\sqrt{5}}{2}$ . Следовательно, три корня имеет уравнение (19):  $x_1 = 0,5$ ;  $x_2 = 0,5 + \frac{\sqrt{5}}{2}$ ;  $x_3 = 0,5 - \frac{\sqrt{5}}{2}$ .

Мгновенная динамическая мощность потерь ненулевая только в интервале  $0 < t < t_f$ , следовательно, смысл имеет только первый корень  $x=0,5$  или

$$t(P_{max}) = \frac{t_f}{2} \quad (21)$$

Таким образом, мгновенная мощность максимальна на середине интервала спада обратного тока и составляет:

$$P_{max} = \frac{9}{16} I_{RM} V_{RM} \quad (22)$$

При подстановке (17) в (1), получим мощность коммутационных потерь:

$$P_d = \frac{11}{30} I_{RM} V_{RM} t_f f \quad (23)$$

Из сравнения выражений (6) и (23) следует, что мощность коммутационных потерь имеет аналогичную зависимость от параметров обратных токов и напряжений, но возрастает по сравнению с линейным характером изменения токов и напряжений в 2,2 раза.

Осциллограммы обратных тока и напряжения в общем случае можно описать уравнениями:

$$i(t) = -I_{RM} f_1(x) \quad (24)$$

$$v(t) = -V_{RM} f_2(x) \quad (25)$$

где  $x = \frac{t}{t_f}$  - безразмерное время, изменяющееся в пределах  $0 \leq x \leq 1$ .

Функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  – нормированные функции, также изменяющиеся в пределах  $0 < f(x) < 1$ . При подстановке (24) и (25) в (1) получаем мощность коммутационных потерь:

$$P_d = k I_{RM} V_{RM} t_f f \quad (26)$$

где

$$k = \int_0^1 f_1(x) f_2(x) dx \quad (27)$$

Поскольку нормированные функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  изменяются в пределах от 0 до 1, то интеграл (27) также изменяется в пределах  $0 < k < 1$ . Действительно, в общем случае нормированные функции  $f_1$  и  $f_2$  при условии их монотонности можно описать степенными функциями вида

$$f_1 = x^n - 1 \quad (28)$$

$$f_2 = (1 - x)^n - 1 \quad (29)$$

где показатель степени  $n$  может изменяться от долей единицы до нескольких единиц. Результаты численного интегрирования выражения (27) при подстановке (28) и (29) в зависимости от показателя степени  $n$  показаны на рисунке 3.

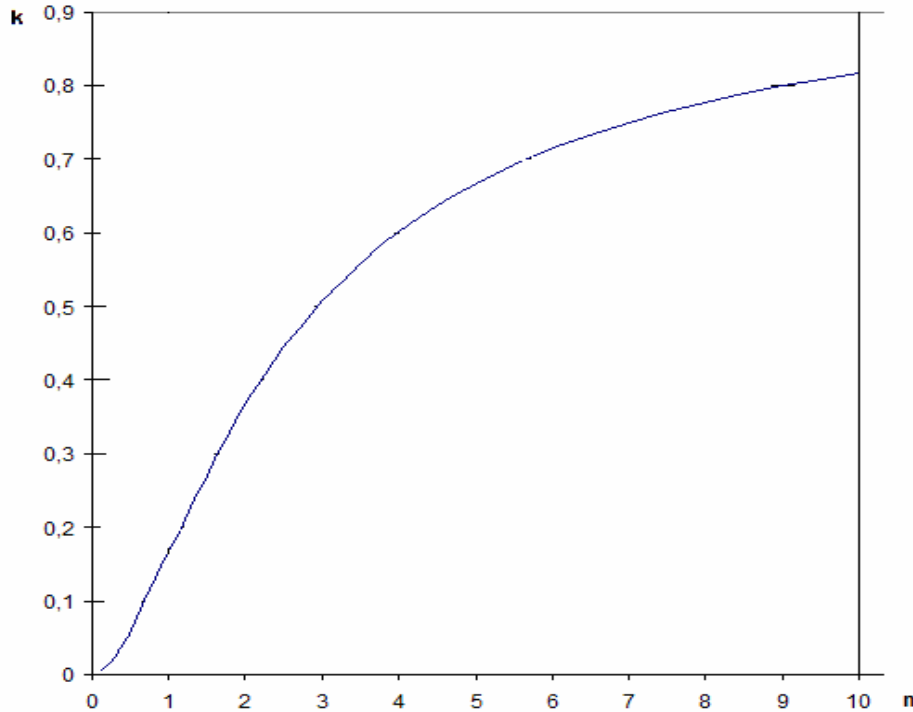


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента  $k$  от показателя степени  $n$

При сублинейном характере изменения  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  интеграл находится в пределах  $0 < k < 1/6$ , при суперлинейном характере изменения  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  интеграл находится в пределах  $1/6 < k < 0,9$ .

Таким образом, интеграл (27) представляет собой постоянный множитель, находящийся обычно в пределах от  $1/6$  до  $1/2$ , и величина его зависит от формы изменения обратных токов и напряжений на диоде в режиме переключения, то есть мощность коммутационных потерь на диоде всегда прямо пропорциональна параметрам режима переключения:  $I_{RM}$ ;  $V_{RM}$ ; длительности спада обратного тока  $t_f$  и частоте переключений  $f$ .

### Литература

1. The Design, Application and Production-Testing of High-Power Fast Recovery Diodes / N.Galster e.a. // Power Conversion Proceedings, PCIM98. P1–11.
2. Энциклопедия элементарной математики, под ред. П.С.Александрова (и др.), кн. 2, М.-Л., 1951. 456 с.