

СИМАКОВ С. А.

**СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
НА СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ**

Аннотация. В статье рассмотрены существующие подходы к решению задачи ограничения коммутационных перенапряжений на силовых полупроводниковых приборах. Представлены математические зависимости, описывающие переходные процессы, протекающие в силовых полупроводниковых приборах при их выключении с учетом заданных значений параметров снабберных цепей. Сделаны выводы о достоинствах и недостатках рассмотренных методик и показаны возможные пути их усовершенствования.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, переходный процесс, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.

SIMAKOV S. A.

**LIMITING SWITCHING OVERVOLTAGE
ON POWER SEMICONDUCTOR DEVICES**

Abstract. This article discusses the current approaches to the problem of limiting switching overvoltage on power semiconductor devices. The author studies the mathematical relations that describe transient processes when turning off power semiconductor devices considering the set of parameter values of snubber circuits. Conclusions are made on the advantages and disadvantages of the methods. Some ways of their improvement are suggested.

Keywords: power semiconductor devices, the transient switching, overvoltage, snubber circuit.

При переключении силовых полупроводниковых приборов (СПП) вентильного плеча из состояния высокой проводимости (СВП) в состояние низкой проводимости (СНП) на них возникают коммутационные перенапряжения в момент изменения полярности напряжения на приборе. Для защиты СПП от подобного рода перенапряжений используются снабберные цепи. В [1] описаны переходные процессы, протекающие в СПП при его выключении, и представлена методика расчета значений параметров снабберных цепей, обеспечивающих защиту приборов от коммутационных перенапряжений. Рассмотрим данную методику. Все зависимости, приведенные в данном разделе, получены в [1].

На рисунке 1 представлены переходные процессы тока и напряжения, которые возникают при выключении СПП. Из-за наличия в цепи коммутации индуктивности L изменение направления тока i_A происходит не мгновенно, а в течение определенного интервала времени t_K . Поскольку t_K имеет порядок 10^{-3} с, а процесс выключения СПП равен 10^{-5} – 10^{-4} с, то принято, что

на интервале выключения прибора напряжение на нем не изменяется $u_K = U_K = const$.

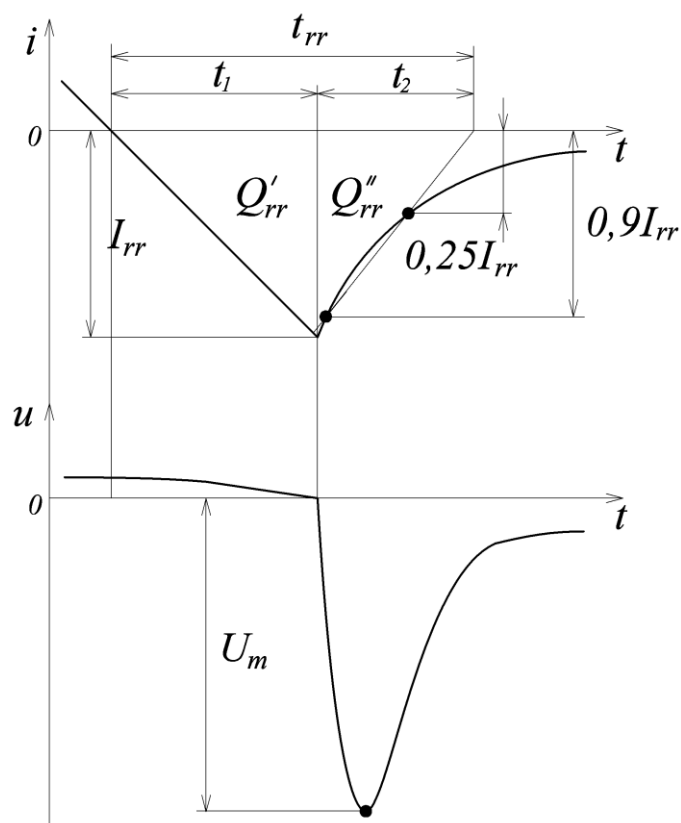


Рис. 1 Переходные процессы, протекающие в СПП при его выключении.

Скорость спада тока i_A описывается выражением:

$$di_A / dt = \frac{U_K}{L}. \quad (1)$$

Рисунок 1 показывает, что при переходе тока i_A через нуль напряжение на СПП начинает падать и достигает нулевого значения к моменту времени, соответствующему амплитуде обратного тока I_{rr} . При переходе напряжения на приборе через нуль на нем возникает коммутационное перенапряжение с амплитудой U_m .

На интервале времени t_1 (рис. 1) наблюдается возрастание обратного тока i_{rr} по практически линейному закону до значения, равного амплитуде тока обратного восстановления I_{rr} . На интервале спада обратный ток аппроксимируется прямой линией, проводимой через точки $0,25I_{rr}$ и $0,9I_{rr}$. Промежуток времени между точкой пересечения данной прямой и осью абсцисс и точкой, в которой обратный ток достигает амплитуды, образует интервал t_2 (рис. 1). Времени обратного восстановления t_{rr} соответствует отрезок, заключенный между пересечениями оси абсцисс прямым спадающим током и прямой линией, аппроксимирующей обратный ток i_{rr} .

Величина заряда обратного восстановления Q_{rr} равна площади треугольника,

образованного линией обратного тока, нарастающего от 0 до I_{rr} , линией аппроксимации и отрезком оси абсцисс:

$$Q_{rr} = Q'_{rr} + Q''_{rr}, \quad (2)$$

где Q'_{rr} – заряд на интервале t_1 ; Q''_{rr} – заряд на интервале t_2 .

Амплитуда тока обратного восстановления I_{rr} определяется по формуле:

$$I_{rr} = \frac{2Q_{rr}}{di_A / dt}, \quad (3)$$

где di_A / dt – скорость спада прямого тока i_A .

Продолжительность интервала времени t_1 равна:

$$t_1 = \frac{I_{rr}}{di_A / dt}. \quad (4)$$

Продолжительность интервала времени t_2 , в соответствии с рисунком 1, рассчитывается следующим образом:

$$t_2 = t_{rr} - t_1. \quad (5)$$

В справочных материалах приводятся значения Q_{rr} и t_{rr} , полученные при определенной величине скорости спада тока di_A / dt в СВП. Для того чтобы определить значения данных параметров для конкретного режима работы устройства силовой электроники, когда di_A / dt отличается от справочной, принимают аппроксимацию, что величины заряда обратного восстановления Q_{rr} и времени обратного восстановления t_{rr} равны:

$$Q_{rr\Phi} = Q_{rr} \left(\frac{I_A}{I_M} \right)^{0,4} \left(\frac{di_A / dt}{di_M / dt} \right)^{0,6}; \quad (6)$$

$$t_{rr\Phi} = t_{rr} \left(\frac{di_A / dt}{di_M / dt} \right)^{0,4} \left(\frac{I_A}{I_M} \right)^{0,1}, \quad (7)$$

где I_A – фактическое значение тока за время $2t_{rr}$, перед переходом через нуль; I_M – значение классифицированного тока, при котором проведены измерения справочных данных.

При проведении расчетов значений параметров защитных снабберных цепей и определении мощности потерь в СПП используют следующую зависимость заряда обратного восстановления Q_{rr} на интервале от момента достижения обратным током максимального значения $(t-t_1)$ до конца приложения обратного напряжения:

$$Q_{rr} = Q_0 \exp(-t/t_{rr}), \quad (8)$$

где Q_0 – накопленный заряд при $t = 0$.

Зависимость обратного тока i_{rr} при этом описывается выражением:

$$i_{rr} = I_{rr} \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_i}\right), \quad (9)$$

где τ_i – постоянная времени, характеризующая скорость спада i_{rr} .

Значение τ_i определяется следующим образом. Координаты точек пересечения кривой обратного тока i_{rr} , выраженного в соответствии с (9) экспоненциальной зависимостью, с прямой, аппроксимирующей обратный ток i_{rr} , равны:

$$x = \frac{t}{\tau_i}; \quad (10)$$

$$y = \frac{i_{rr}}{I_{rr}}. \quad (11)$$

Из рис. 1 и зависимостей (9–11) получены координаты данных точек: $x_1 = 0,1$; $y_1 = -0,9$; $x_2 = 1,39$; $y_2 = 0,25$.

Уравнение прямой, проходящей через эти точки, имеет вид:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (12)$$

Подставляя рассчитанные координаты в выражение (12), получаем:

$$\frac{x - 0,1}{1,39 - 0,1} = \frac{y + 0,9}{-0,25 + 0,9}. \quad (13)$$

Подставляя в выражение (13) значение $y = 0$, находим $x = 1,89$. Тогда из (10) получаем выражение для нахождения τ_i :

$$\tau_i = \frac{t_2}{x} = \frac{t_2}{1,89} = 0,53t_2. \quad (14)$$

На рисунке 2 представлена эквивалентная схема, предназначенная для расчета переходных процессов, протекающих в СПП при его выключении, и определения значений параметров защитных снабберных цепей, ограничивающих коммутационные перенапряжения.

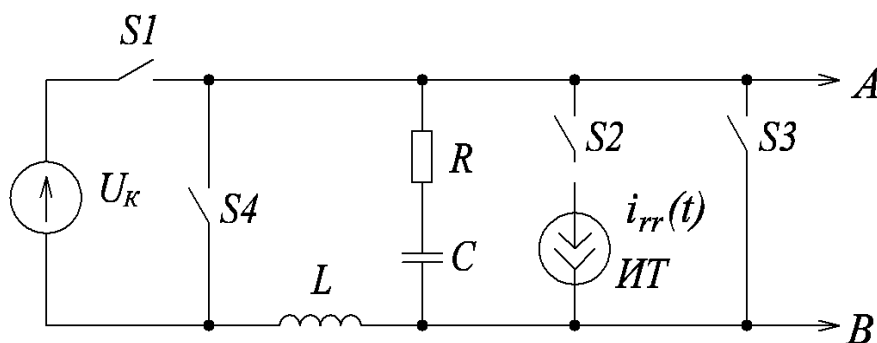


Рис. 2 Эквивалентная схема замещения СПП при его выключении.

На рисунке 2 введены следующие обозначения: U_K – напряжение на СПП в момент коммутации; L – суммарная индуктивность контура коммутации; $ИТ$ – источник тока, реализующий функцию тока обратного восстановления СПП; R и C – резистор и конденсатор снабберной цепи; $S1$ – $S4$ – идеальные ключи, действием которых воспроизводятся режимы работы СПП при его выключении, A и B – точки, с которых снимается напряжение на СПП.

Режим коммутации осуществляется следующим образом.

1. Протекание неограниченного обратного тока ($S1$ и $S3$ замкнуты).
2. Протекание спадающего обратного тока ($S3$ и $S4$ разомкнуты).

В момент t_1 (рис. 1), когда обратный ток i_{rr} достигает амплитудного значения I_{rr} , замыкается $S2$ и размыкается $S3$. Напряжение u_{AK} , прикладываемое к СПП, возникает между точками A и B (рис. 2).

Напряжение u_{AK} на СПП при его выключении может иметь колебательный и апериодический характер. На рис. 3 представлены зависимости напряжения на приборе при различном характере переходных процессов.

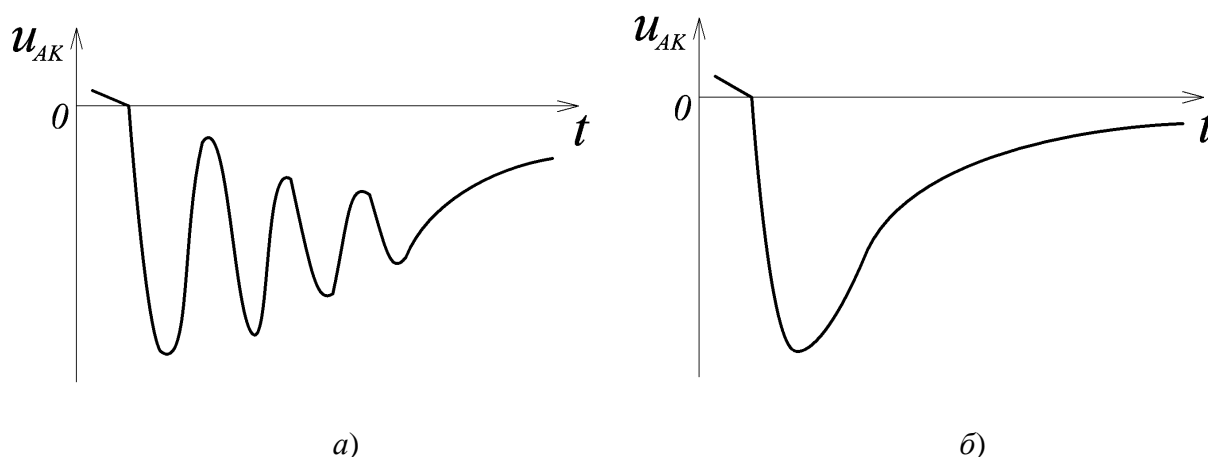


Рис. 3 Колебательный (а) и апериодический (б) характер переходного процесса выключения СПП.

Закон изменения напряжения на СПП для колебательного процесса описывается следующим выражением:

$$u_{AK}(t) = U_K + (A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t) \exp(-bt) + D_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (15)$$

где A_1, B_1, D_1 – постоянные интегрирования, зависящие от амплитудного значения обратного тока I_{rr}, L, R, C ; b – корень характеристического уравнения, зависящий от L и R ; ω – круговая частота.

Закон изменения напряжения на СПП при апериодическом процессе описывается следующим выражением:

$$u_{AK}(t) = U_K + (A_2 \exp(\lambda t) + B_2 \exp(-\lambda t)) \exp(-bt) + D_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (16)$$

где A_2 , B_2 , D_2 – постоянные интегрирования, зависящие от I_{rr} , L , R , C ; λ – корень характеристического уравнения, зависящий от L , C и R .

Уравнения (15) и (16) решены с помощью ЭВМ при подстановке различных значений C , R и τ_i . На основании результатов расчета построены графики для колебательного и апериодического режима. На рис. 4 изображены полученные кривые для колебательного процесса демпфирования.

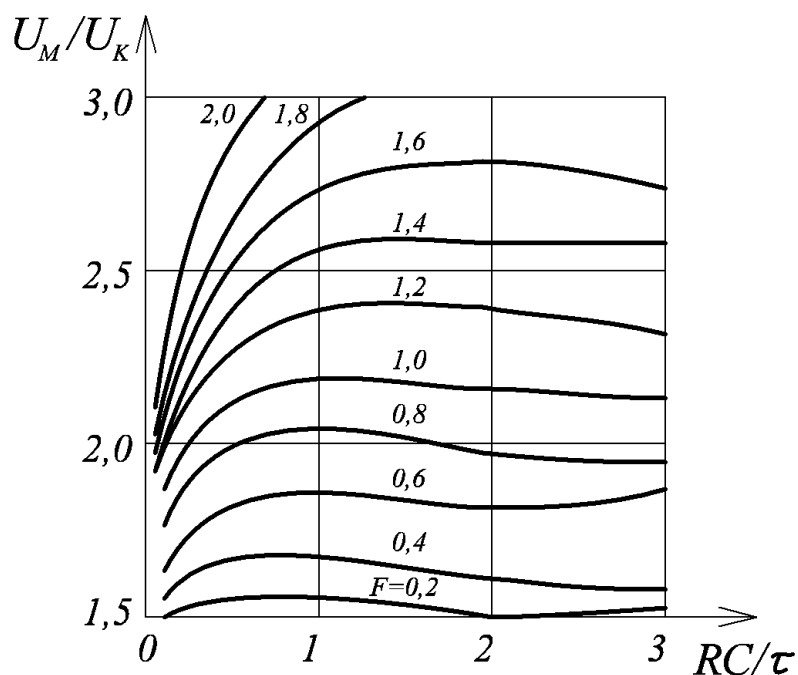


Рис. 4 Кривые для выбора значений параметров защитных снабберных цепей при колебательном процессе демпфирования.

Зная значение U_M/U_K , можно ориентировочно найти значение F (рис. 4) для выбранного СПП, а по нему выбрать приблизительно величины R и C , соответствующие I_{rr} и t_{rr} данного прибора (значение RC/τ_i выбирается в пределах 1–5).

По определенным значениям R и C из выражений (15) и (16) рассчитывается максимальное значение обратного напряжения.

Поскольку расчет рабочего режима прибора осуществляется по значениям шести величин (L , U_K , R , C , I_{rr} , τ_i), которые нелинейно влияют друг на друга, в то время как график (рис. 4) содержит только три связи, изначально выбранные значения могут не совпадать с требуемыми или являться неоптимальными. По этой причине требуется проводить расчет

фактического значения U_M с последовательным приближением к оптимальному результату.

Существуют следующие недостатки описанного метода определения значений параметров снабберных цепей, обеспечивающих защиту СПП от коммутационных перенапряжений при их выключении.

1. Значения заряда обратного восстановления $Q_{rr\Phi}$ и времени обратного восстановления $t_{rr\Phi}$ для конкретного режима работы СПП, на основе которых рассчитываются величины параметров снабберных цепей, определяются путем их пересчета из справочных значений Q_{rr} и t_{rr} . Это приводит к возникновению погрешности определения $Q_{rr\Phi}$ и $t_{rr\Phi}$.

2. Значения $Q_{rr\Phi}$ и $t_{rr\Phi}$, рассчитанные на основе справочных данных, являются обобщенными для приборов определенного типа. В реальных СПП наблюдается значительная вариация величин данных параметров [2; 3], поэтому значения параметров защитных снабберных цепей требуется рассчитывать исходя из измеренных величин Q_{rr} и t_{rr} для каждого конкретного прибора.

3. В данном методе не учитываются температурные зависимости значений параметров СПП. Поскольку справочные значения параметров приборов определяются при максимально допустимой величине температуры их ПС T_{jm} [4; 5], а в реальных режимах работы СПП эксплуатируются при значительно меньших значениях температуры ПС T_j , то величины параметров защитных снабберных цепей окажутся неоптимальными.

4. Поскольку значения параметров снабберных цепей определяются приблизительно по графику (рис. 4) и существует определенная погрешность определения, то для обеспечения защиты СПП от коммутационных перенапряжений при расчете вводится запас, позволяющий скомпенсировать данную погрешность. Это приводит к необоснованному завышению значений параметров снабберных цепей.

Для оптимизации значений параметров снабберных цепей необходимо:

- использовать усовершенствованные методики расчета значений параметров снабберных цепей, позволяющие учитывать вариацию величин параметров полупроводниковой структуры (ПС) СПП и их температурную зависимость [6; 7; 8];
- применять математические модели реальных СПП [9; 10], в которых существует возможность задавать значения параметров их ПС [11];
- учитывать реальные значения параметров контура коммутации [12; 13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович М. И., Бабайлов В. М., Либер В. Е. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 215–235.

2. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. – Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2012. – С. 234–238.
3. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование вариации величины заряда обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // Электроника и информационные технологии. – 2011. – Вып. 2 (11). – Режим доступа: http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse_recovery_charge.pdf. – 0421100067/0026.
4. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С. Испытательная аппаратура для определения электрических и тепловых параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // Электроника и информационные технологии. – 2012. – Вып. 1 (12). – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Bespalov%20Ilin%20Kapitonov.pdf> – 04201200067/0004.
5. Bepalov N. N., Ilyin M. V., Kapitonov S. S. Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state // 11th International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012. – Novosibirsk: IEEE, 2012. – № 1. – pp. 143–147.
6. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // Нелинейный мир. – 2011. – Вып. 8. – С. 500–506.
7. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Определение минимальных величин емкостей снабберных цепей для ограничения коммутационных перенапряжений на силовых полупроводниковых приборах при их выключении // Естественные и технические науки. – 2011. – Вып. № 6. – С. 396–404.
8. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Капитонова А. В. Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – Вып. № 1. – С. 65–68.
9. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. – 2011. – Вып. №6. – С. 405–412.
10. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim // Электроника и электрооборудование транспорта. – Томилино: Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод», 2012. – Вып. № 4. – С. 30–35.

11. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Пьянзин И. И. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Электроника и информационные технологии [Электронный ресурс]. – 2010. – Вып. 2 (9). – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/LowConductivity.pdf> – 04201000067/0036.

12. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С. Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах: Т. 1. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 362–364.

13. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Моделирование распределения напряжения по силовым полупроводниковым приборам в состоянии низкой проводимости при их последовательном групповом соединении // Техническая электродинамика. Тем. вып. – Киев: Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, 2011. – С. 270–275.