

**ЕВИШЕВ А. В.**

**СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ЗАПИРАЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМ  
СИЛОВЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРИБОРАМ**

**Аннотация.** В статье приведены математические зависимости, описывающие процессы, которые протекают в приборах вентильного плеча при их выключении. Рассмотрены подходы к определению значений параметров снабберных цепей. Сделаны выводы о недостатках существующих методик и показаны возможные пути их усовершенствования.

**Ключевые слова:** силовой полупроводниковый прибор, последовательное групповое соединение, переходный процесс, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.

**EVISHEV A. V.**

**ENSURING EQUAL DISTRIBUTION OF REVERSE VOLTAGE  
ON SERIES-CONNECTED POWER SEMICONDUCTOR DEVICES**

**Abstract.** The article presents the mathematical relationships describing the processes that occur in valve shoulder devices when turned off. The approaches to defining snubber circuit parameters are considered. Conclusions are made on the shortcomings of the existing techniques. Some ways of their improvement are suggested.

**Keywords:** power semiconductor device, series connection, transient switching, overvoltage, snubber circuit.

**Введение.** Групповое последовательное соединение силовых полупроводниковых приборов (СПП) используется в том случае, когда напряжение, которое прикладывается к вентильному плечу, превышает напряжение класса отдельных приборов.

Основной задачей при последовательном соединении СПП является обеспечение равномерного распределения напряжения вентильного плеча по приборам группы. Поскольку значения основных параметров СПП, таких как ток утечки в состоянии низкой проводимости (СНП), барьерная емкость, время задержки и время включения тиристорov, время обратного восстановления и заряд обратного восстановления, имеют технологический разброс, то при последовательном групповом соединении требуется компенсировать различия в величинах данных параметров приборов.

**Обзор существующих способов.** Схема группового последовательного соединения трех тиристоров представлена на рисунке 1.

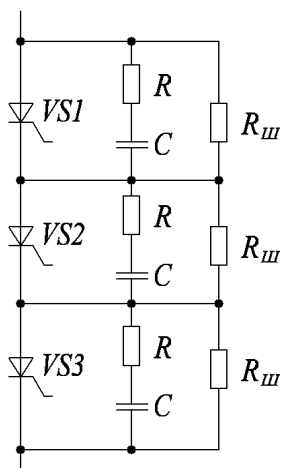


Рис. 1 Схема последовательного соединения тиристоров.

Метод, рассмотренный в [1], позволяет рассчитывать значения параметров устройств, обеспечивающих защиту СПП вентильного плеча при их выключении от различных перенапряжений.

В [1] рассматривается динамическое распределение напряжения по приборам последовательной группы при их выключении. На рисунке 2 представлены зависимости токов и напряжений на СПП вентильного плеча, состоящего из двух приборов с различными значениями  $Q_{rr}$ .

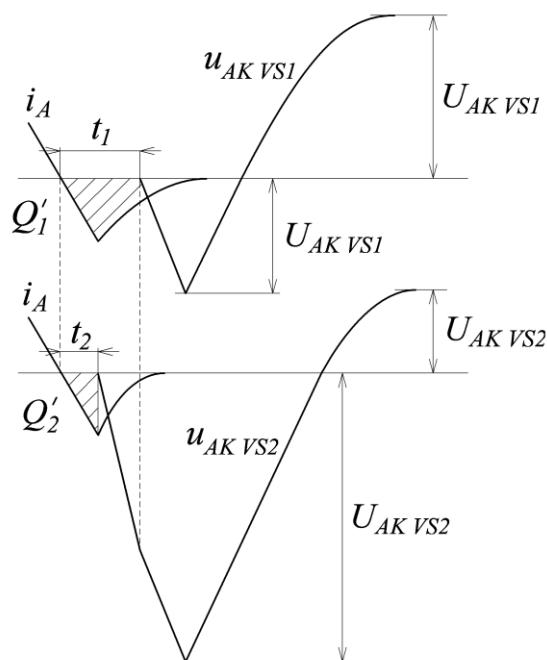


Рис. 2 Зависимости токов и напряжений на СПП вентильного плеча, состоящего из двух приборов с различными значениями  $Q_{rr}$ .

Вследствие наблюдаемого технологического разброса значений заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  отдельных приборов вентильного плеча, различаются величины их времени обратного восстановления  $t_{rr}$ , что приводит к неодновременному выключению СПП. При выключении СПП последовательной группы перенапряжение возникает на приборе с меньшим значением  $Q_{rr}$ , поскольку он выключается первым и к нему прикладывается напряжение вентильного плеча.

Из рисунка 2 видно, что накопленный заряд первого прибора  $Q_1'$  больше, чем заряд второго прибора  $Q_2'$ . На рисунке  $t_1$  и  $t_2$  – временной интервал между точками прохождения через нуль тока, протекающего через СПП, и напряжения на нем для первого и второго приборов, соответственно;  $i_A$  – ток, протекающий через вентильное плечо в состоянии высокой проводимости (СВП);  $u_{AK\ VS1}$  и  $u_{AK\ VS2}$  — напряжения на первом и втором приборах вентильного плеча, соответственно.

Рисунок 2 показывает, что при выключении второго прибора с меньшим значением  $Q_{rr}$ , начиная с момента перехода напряжения  $u_{AK\ VS2}$  через нуль, к нему прикладывается общее напряжение вентильного плеча. В момент времени, соответствующий переходу напряжения  $u_{AK\ VS1}$  через нуль, закрывается первый прибор с большим значением  $Q_{rr}$ , и общее напряжение начинает распределяться между двумя приборами группы.

Для расчета процессов, протекающих в вентильном плече, состоящего из двух приборов с различными значениями  $Q_{rr}$ , рассмотрена схема, представленная на рисунке 3.

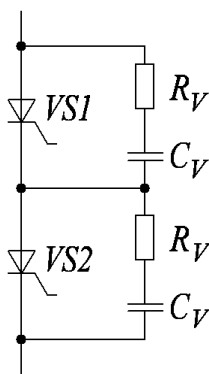


Рис. 3 Схема для расчета процессов, протекающих в вентильном плече, при выключении приборов с различными значениями  $Q_{rr}$ .

Рассмотрение процессов, протекающих в схеме (рисунок 3), позволяет определить разброс величин напряжений на отдельных приборах вентильного плеча в состоянии низкой проводимости при заданных значениях параметров снабберных цепей. Значения емкости снабберных конденсаторов  $C_V$  и сопротивления снабберного резистора  $R_V$  рассчитываются для всего вентильного плеча в соответствии с методом, описанным в [1]. Для расчета

необходимо знать амплитудное значение напряжения на контуре  $U_K = U_M$ , величины индуктивности контура коммутации  $L$ , и максимальные значения  $Q_{rr}$ ,  $I_{rr}$  и  $t_{rr}$  полупроводникового прибора, определенные из справочных данных. Полученные в результате расчета значения  $C$  и  $R$  распределяются по  $n$  контурам последовательно соединенных СПП. Значения сопротивления снабберных резисторов  $R_V$  и емкости снабберных конденсаторов  $C_V$  для отдельных СПП вентильного плеча определяются следующим образом [1]:

$$R_V = \frac{1}{n} R; \quad C_V = nC, \quad (1)$$

где  $R_V$  и  $C_V$  — сопротивление и емкость делительного контура  $V$ -ого СПП.

Из рисунков 2 и 3 видно, что прибор  $VS1$  имеет больший остаточный заряд  $Q_1'$ , вследствие чего смещается момент спада прямого напряжения на нем до нуля. Разность зарядов  $\Delta Q_{rr}$  приборов заряжает конденсатор  $C_V$ , и на нем появляется напряжение  $\Delta U_V$ , которое равно [1]:

$$\Delta U_V = \Delta Q_{rr} / C_V. \quad (2)$$

С учетом (2) получены выражения для полного напряжения на приборах  $VS1$  и  $VS2$  [1]:

$$U_{VS1} = \frac{1}{2} U_{AK}(t) + \frac{\Delta Q_{rr}}{C_V}; \quad (3)$$

$$U_{VS2} = \frac{1}{2} U_{AK}(t) - \frac{\Delta Q_{rr}}{C_V}. \quad (4)$$

По полученным выражениям (3) и (4) определяют значение максимально возможного отклонения напряжения  $\Delta U_V$  на приборах вентильного плеча от среднего значения и величины напряжения на СПП. В том случае, если значение напряжения на СПП превышает требуемое значение, то увеличивают количество приборов в вентильном плече. С помощью осуществления данных операций метод, описанный в [1], предусматривает обеспечение равномерного распределения напряжения по СПП при их последовательном групповом соединении.

В [2] представлена формула для расчета значений емкости снабберных конденсаторов, обеспечивающих равномерное распределение напряжения по приборам последовательной группы в переходных режимах:

$$C \geq \frac{(n-1)\Delta Q_{rr}}{nU - E_K} 10^{-6}, \quad (5)$$

где  $n$  — число последовательно включенных приборов;  $\Delta Q_{rr}$  — наибольшая возможная разность зарядов обратного восстановления приборов вентильного плеча;  $U$  — наибольшее допустимое напряжение на приборе;  $E_K$  — наибольшее напряжение, прикладываемое к вентильному плечу.

Формула (5) может быть использована для расчета значений емкости снабберных конденсаторов только в том случае, если возможно оценить с высокой точностью величину  $\Delta Q_{rr}$ . В [2] отсутствует информация о том, каким образом следует проводить оценку значения  $\Delta Q_{rr}$ , поэтому для точного расчета значений емкости снабберного конденсатора нельзя использовать данный метод [2].

Существуют методы определения значений емкости снабберного конденсатора, которые основаны на использовании при расчете справочных данных СПП. В [3] данная емкость рассчитывается по формуле:

$$C = (0,3 \div 0,6) \frac{Q_{rr}}{0,8U_{RRM}}, \quad (6)$$

где  $Q_{rr}$  – справочное значение заряда обратного восстановления приборов;  $U_{RRM}$  – справочное значение повторяющегося импульсного обратного напряжения приборов. Коэффициент, расположенный перед формулой (6), выбирается, исходя из значения скорости спада тока в СВП.

**Выводы.** Существующие методы [1–3] расчета значений параметров защитных снабберных цепей, обеспечивающих равномерное распределение напряжения по СПП при их последовательном групповом соединении, обладают рядом существенных недостатков.

1. При расчете значений параметров снабберных цепей используются справочные данные приборов, которые являются максимально возможными для данных СПП, поэтому значения емкости оказывается существенно завышенным [4].

2. Метод, рассмотренный в [1], предусматривает увеличение количества СПП в последовательной группе в том случае, если при использовании снабберных цепей с рассчитанными значениями параметров величины напряжения на отдельных приборах не удовлетворяют требуемым значениям. Это приводит к увеличению массогабаритных показателей УСЭ и неполному использованию приборов по мощности, что экономически невыгодно.

3. В методах, приведенных в [1–3], значения напряжений на СПП и величины емкости снабберных конденсаторов рассчитываются на основе информации о наибольшей возможной разности зарядов обратного восстановления приборов вентильного плеча  $\Delta Q_{rr}$ . Однако данные методы, опираясь на справочные данные приборов, не описывают способов определения значения  $\Delta Q_{rr}$ , что приводит к необъективности оценки величин емкости снабберных конденсаторов. Это приводит к неоправданному завышению этих величин, что увеличивает массу и габариты преобразователей [5; 6].

Для оптимизации значений параметров снабберных цепей необходимо:

- применять усовершенствованные методики отбраковки и подбора силовых

полупроводниковых приборов для группового последовательного соединения и определения значений параметров снабберных цепей [7–9];

– использовать для исследования процессов, протекающих в вентильном плече, математические модели реальных СПП [10, 11], в которых существует возможность задавать значения параметров их полупроводниковой структуры ПС [11; 12];

– с помощью специальной испытательно-измерительной аппаратуры [13–21] определять реальные значения параметров каждого прибора и на основе полученных данных формировать их группы для последовательного соединения в преобразователях электрической энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

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

2. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

3. ЗАО «Протон-Электротекс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://proton-electrotex.com/ru/articles/>.

4. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Моделирование зависимости величины суммарной мощности потерь силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости от величин электрофизических параметров их полупроводниковой структуры // Технологии инновационных залуу судлаачдын нийгэмлэг. Эрдэм шинжилгээний бага хурлын эмхэтгэл «Khurel Togoot-2011. – Улан-Батор, 2011. – С. 178–180.

5. 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](http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse_recovery_charge.pdf). – 0421100067/0026.

6. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения: материалы науч. конф. в 3 ч: Ч. 2. – Саранск, 2012. – С. 234–238.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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. – № 6 – С. 405–412.

11. 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. – 2012. – Вып. № 4. – С. 30–35.

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

13. 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.

14. 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. – С. 362–364.

15. Беспалов Н. Н., Лысенков А. Е., Ильин М. В., Капитонов С. С. Аппаратно-программный комплекс для испытания силовых МДП-транзисторов // Компьютерные измерительные технологии. Материалы I Международного симпозиума. – М: Общество с ограниченной ответственностью «ДМК пресс. Электронные книги». 2015. – Том 1. – С. 168–171.

16. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лысенков А. Е. Испытательное оборудование на базе технологий компании NATIONAL INSTRUMENTS для определения вольт-амперной характеристики силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости // Компьютерные измерительные технологии. Материалы I Международного симпозиума. – М: Общество с ограниченной ответственностью «ДМК пресс. Электронные

книги», 2015. – Том 1. – С. 97–100.

17. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Матюшкин В. В. Генератор испытательных импульсов для диагностики силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/generator-ispytatelnykh-impulsov-dlya-diagnostiki-silovykh-poluprovodnikovyykh-priborov-v-sostoyanii-nizkojj-provodimosti>.

18. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Смолин А. Н. Обзор устройств для измерения значений параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – № 22. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/obzor-ustrojstv-dlya-izmereniya-znachenijj-parametrov-i-kharakteristik-silovykh-poluprovodnikovyykh-priborov-v-sostoyanii-nizkojj-provodimosti>.

19. Беспалов Н. Н., Мускатынцев А. В. «АДИП»: Диагностика силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 38–39.

20. Беспалов Н. Н., Попов А. А. Устройство для термостатирования полупроводниковых приборов при определении электрических и тепловых характеристик // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 2. – С. 112–115.

21. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Попов А. А. Устройство термостатирования транзисторов при определении их характеристик // Компьютерные измерительные технологии. Материалы I Международного симпозиума. – М: Общество с ограниченной ответственностью «ДМК пресс. Электронные книги», 2015. – Том 1. – С. 100–103.