

БЕСПАЛОВ Н. Н., ИЛЬИН М. В., КАПИТОНОВ С. С., ЕВИШЕВ А. В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЦЕПЯХ С
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ГРУППОВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СИЛОВЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ИХ ВЫКЛЮЧЕНИИ**

Аннотация. Проведено моделирование последовательного группового соединения силовых полупроводниковых приборов при различных значениях параметров снабберных цепей. Сделаны выводы о возможностях оптимизации значений параметров снабберных цепей.

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

BESPALOV N. N., ILYIN M. V., KAPITONOV S. S., EVISHEV A. V.

**A STUDY OF THE PROCESSES IN CIRCUITS WITH SERIAL GROUP CONNECTION
OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES WHEN SWITCHING OFF**

Abstract. A simulation of serial group connection of power semiconductor devices at various values of the parameters of snubber circuits is carried out. Conclusions are made about the possibilities of optimizing of the parameters of snubber circuits.

Keywords: power semiconductor device, serial group connection, transient process, switching overvoltage, snubber circuit.

Нестабильность технологического процесса обуславливает появление разброса значений электрических и тепловых параметров силовых полупроводниковых приборов (СПП) [1; 2]. Это приводит к тому, что при групповом последовательном соединении СПП в одном вентильном плече могут оказаться приборы с различными значениями параметров. Это связано также с отсутствием информации о значениях параметров каждого отдельно взятого прибора [3; 4].

Вариация электрических и тепловых параметров СПП последовательной цепи обуславливает возникновение разброса значений температуры их полупроводниковых структур (ПС) T_j , что вызывает возникновение в вентильном плече режимов работы неблагоприятных для отдельных приборов. Поэтому исследование процессов в СПП при их групповом последовательном включении является актуальной задачей силовой электроники, решение которой позволит повысить надежность как отдельных приборов, входящих в состав устройства силовой электроники (УСЭ), так и самого УСЭ.

На основе разработанной в среде Multisim модели СПП [5; 6], создана модель, позволяющая исследовать процессы, протекающие в цепях с последовательным групповым соединением приборов.

Для объективного понимания электрических процессов в СПП при их групповом последовательном включении рассмотрено распределение напряжения на вентильном плече, состоящем из трех силовых диодов. Выбор данного количества СПП объясняется тем, что такое соединение приборов в вентильном плече широко используются в УСЭ с фазовым регулированием мощности в нагрузке [7; 8].

Обобщенная схема расчета процессов в СПП при их групповом последовательном включении представлена на рисунке 1.

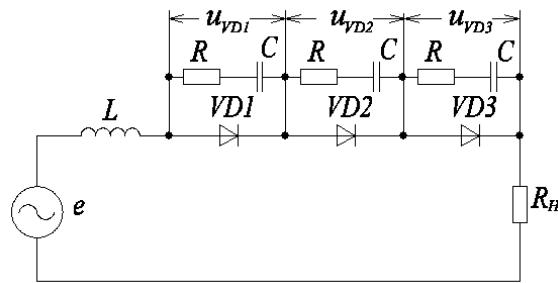


Рис. 1. Последовательное соединение диодов вентильного плеча.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: e – источник питающего напряжения; R_H – сопротивление нагрузки; $VD\ 1, 2, 3$ – исследуемые диоды; L – сумма индуктивностей контура; R – резистор защитной снабберной цепи; C – конденсатор защитной снабберной цепи.

Для исследования выбрана модель диода Д161-200 со значением $I_{FAVm} = 200$ А. Проведено моделирование схемы последовательного соединения СПП без защитных снабберных RC -цепей. Амплитудное значение напряжения источника питающего напряжения e составляет 4,5 кВ, частотой 50 Гц. Значение максимально допустимой температуры ПС диодов Д161-200 равно $T_{jm} = 190$ °С, однако в реальности тепловой режим приборов рассчитывается исходя из условия, чтобы величина T_j находилась в пределах 70–90 °С. При этом величина индуктивности выбрана из соображений увеличения длительности тока в пределах от 10 мс до 12 мс и составила $L = 10$ мГн.

В силовой электронике наиболее распространенным способом борьбы с неравномерным распределением напряжения по приборам вентильного плеча и коммутационными перенапряжениями, возникающими в УСЭ, является использование защитных снабберных RC -цепей (рис. 1).

Проведено исследование работы УСЭ (рис. 1), работающего на активно-индуктивную нагрузку, при разбросе значений температуры ПС СПП в пределах технологического разброса (рис. 2). Величины параметров снабберных цепей составляют $R = 20$ Ом, $C = 1$ мкФ, значение суммарной индуктивности контура коммутации $L = 10$ мГн.

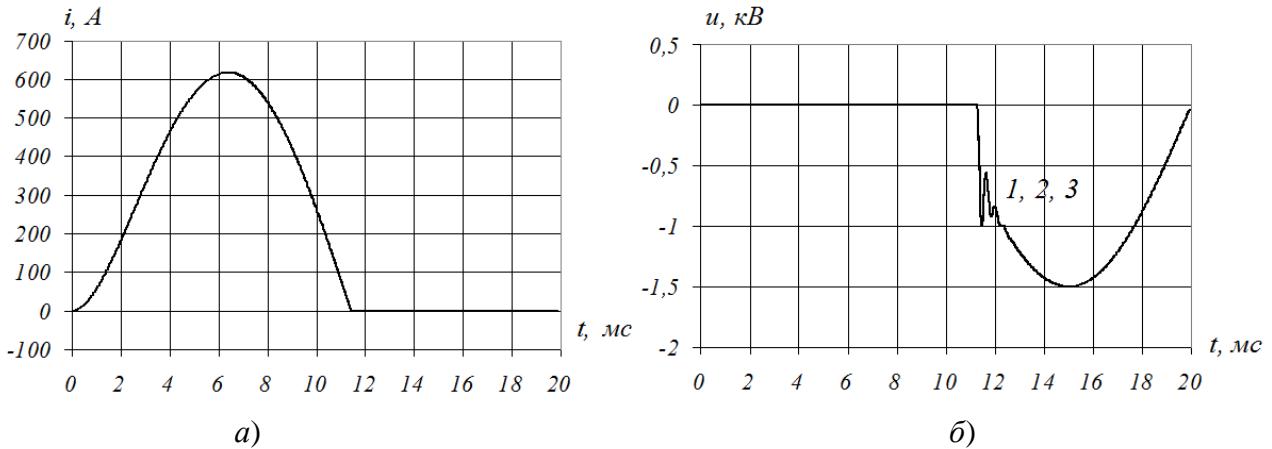


Рис. 2. Ток, протекающий через приборы вентильного плеча (а) и распределение напряжения по СПП при $T_{j1} = 75^{\circ}\text{C}$ (б кривая 1), $T_{j2} = 80^{\circ}\text{C}$ (б кривая 2), $T_{j3} = 85^{\circ}\text{C}$ (б кривая 3) и величинах параметров снабберных цепей $R = 20 \Omega$ и $C = 1 \mu\text{F}$.

Из рисунка 2 видно, что снабберные цепи обеспечивают равномерное распределение напряжения по приборам вентильного плеча. Амплитуда напряжения на каждом из приборов не превышает значения класса, равного 1,5 кВ. Однако значения емкости снабберного конденсатора $C = 1 \mu\text{F}$ недостаточно, чтобы ограничить скорость нарастания напряжения в момент выключения приборов. При значении $C = 1 \mu\text{F}$ характер изменения напряжения на СПП последовательной группы является колебательным, что противоречит требованиям к напряжению на приборах при их выключении, описанным ранее.

Зависимости напряжения на приборах вентильного плеча при переходном процессе их выключения представлены на рисунке 3.

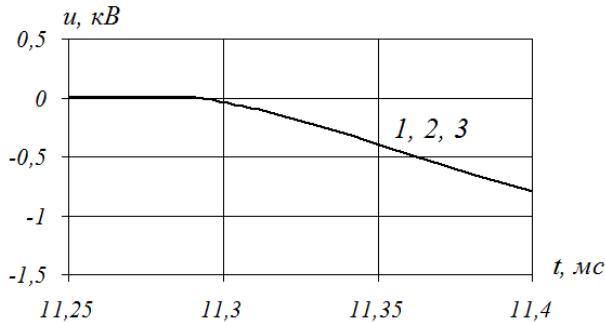


Рис. 3. Напряжения на приборах вентильного плеча при их выключении при $T_{j1} = 75^{\circ}\text{C}$ (кривая 1), $T_{j2} = 80^{\circ}\text{C}$ (кривая 2), $T_{j3} = 85^{\circ}\text{C}$ (кривая 3) и величинах параметров снабберных цепей $R = 20 \Omega$ и $C = 1 \mu\text{F}$.

Рисунок 3 показывает, что при использовании защитных снабберных цепей СПП последовательной группы выключаются одновременно, но для ограничения коммутационных перенапряжений нужно увеличить значение емкости снабберного конденсатора, что приведет к увеличению мощности снабберного резистора.

На практике в УСЭ часто применяется схема встречного включения последовательных тиристорных цепей (рис. 4).

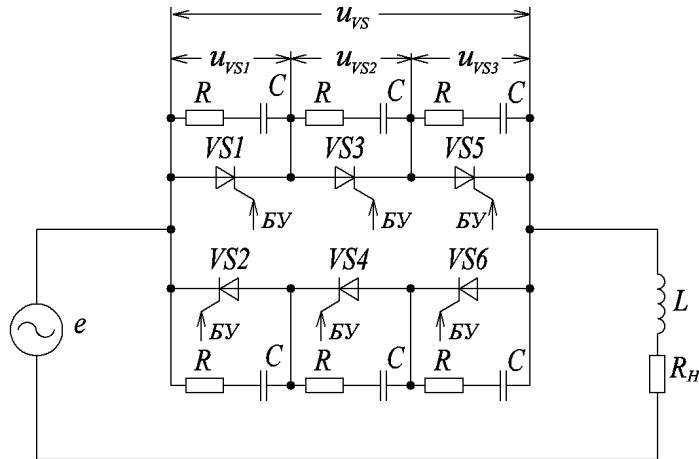


Рис. 4. Встречное включение последовательных тиристорных цепей.

На рисунке 4 введены следующие обозначения: $VS 1\text{--}6$ – исследуемые тиристоры; $БУ$ – блок управления.

Режим работы СПП в схеме, представленной на рисунке 4, усугубляется тем, что при работе вентильного плеча параллельно с ним включена цепь, состоящая из защитных снабберных цепей встречно включенной последовательной цепи. В результате происходит перераспределение токов, протекающих в данной цепи, что отрицательно сказывается на работе УСЭ.

На рисунке 5 представлены напряжения на приборах вентильного плеча и на всем плече при работе схем последовательного включения СПП (рисунок 1) и встречного включения последовательных цепей приборов (рисунок 4).

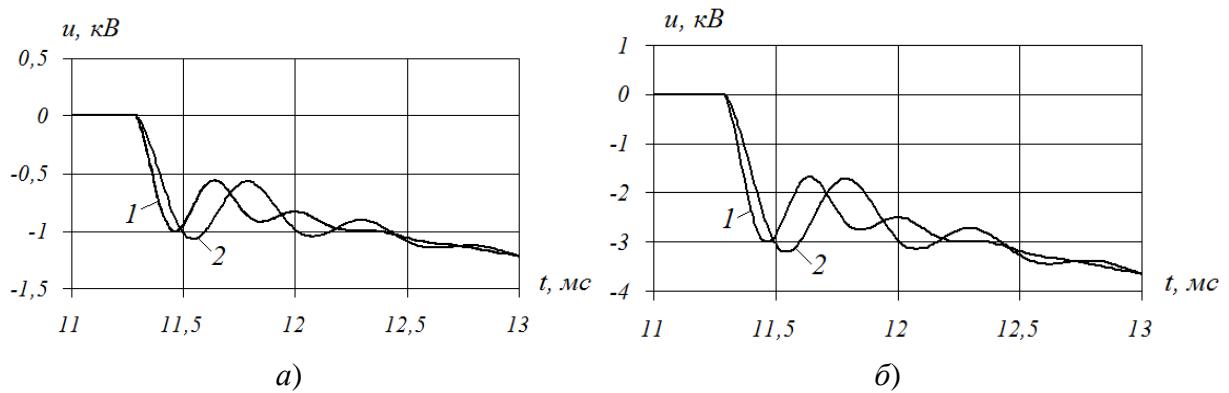


Рис. 5. Напряжения на приборах вентильного плеча (а) и вентильном плече (б) при работе схем последовательного включения СПП (кривая 1) и встречного включения последовательных цепей приборов (кривая 2).

Из рисунка 5 видно, что в схеме последовательного соединения приборов (рис. 1) значение скорости нарастания напряжения как на отдельных приборах, так и на всем

вентильном плече, превышает скорость нарастания напряжения в схеме встречного включения последовательных цепей приборов (рисунок 4). Однако значение амплитуды напряжения на СПП при исследовании схемы, представленной на рисунке 4, превышает значение амплитуды напряжения на приборах в схеме последовательного соединения при одинаковых режимах их работы. Таким образом, для обеспечения защиты приборов вентильного плеча от различного рода перенапряжений нужно подбирать значения параметров защитных снабберных цепей отдельно для каждой схемы.

Исследован режим работы схем последовательного группового соединения СПП и встречного включения последовательных цепей приборов при значении емкости снабберного конденсатора $C = 10 \text{ мкФ}$. На рисунке 6 представлены результаты исследования.

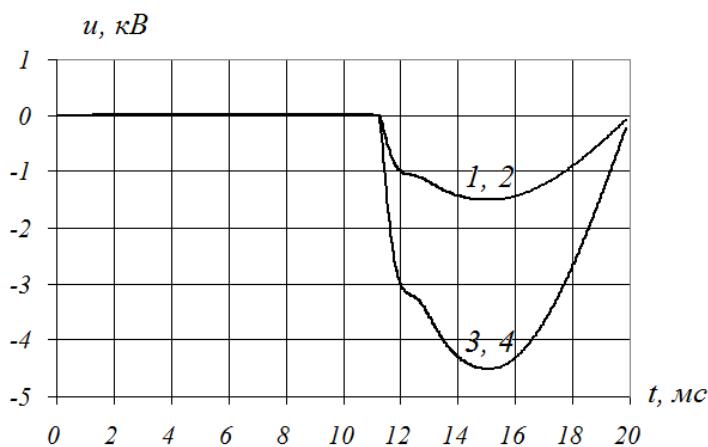


Рис. 6. Напряжения на приборах вентильного плеча (кривые 1, 2) и вентильном плече (кривые 3, 4) при работе схем последовательного включения СПП (кривые 1, 3) и встречного включения последовательных цепей приборов (кривые 2, 4).

Из рисунка 6 заметно, что напряжения как на отдельных приборах, так и на вентильном плече, исследуемых схем совпадают, вследствие использования снабберного конденсатора с большим значением емкости. Емкости снабберного конденсатора $C = 10 \text{ мкФ}$ достаточно, чтобы обеспечить равномерное распределение по приборам вентильного плеча в состоянии низкой проводимости и ограничить коммутационные перенапряжения на них при выключении.

Для схемы встречного включения тиристоров (рис. 4) требуется ограничить скорость нарастания напряжения на приборах, поскольку ко встречно включенным приборам оно прикладывается в прямом направлении и способно перевести их в состояние высокой проводимости. Для тиристоров, рассчитанных на значения предельного тока $I_{TAVm} = 200 \text{ А}$, значение критической скорости нарастания напряжения $(du_D/dt)_{crit}$ в закрытом состоянии в соответствии с [2] равно 20–1000 В/мкс, в то время, как в исследуемой схеме $du_D/dt = 300 \text{ В/мкс}$, поэтому емкости $C = 10 \text{ мкФ}$ для данной схемы может не хватить для

того, чтобы ограничить скорость нарастания напряжения на приборах. Столь большое значение емкости снабберного конденсатора обусловлено тем, что для исследования выбрана завышенная величина индуктивности контура коммутации $L = 10$ мГн, которая очень редко встречается на практике. Кроме того, через ПС СПП протекает ток величиной, равной предельному среднему току, при котором в реальных условиях приборы также эксплуатируются в крайних случаях.

Для минимизации значений параметров защитных снабберных цепей нужно осуществлять подбор СПП для группового последовательного соединения по значениям их параметров, таким образом, чтобы обеспечить одинаковые тепловые режимы приборов в установившемся режиме [9; 10]. При отсутствии разброса значений температуры ПС T_j приборов вентильного плеча напряжение в СНП распределяется по приборам последовательной группы равномерно [11; 12], однако, в момент выключения приборов на них образуется коммутационное перенапряжение, возникающее вследствие наличия индуктивности в контуре коммутации, которое в любом случае следует ограничивать с помощью снабберных цепей.

Для обеспечения защиты от перенапряжений СПП при их последовательном групповом соединении значения параметров снабберных RC -цепей следует рассчитывать для конкретной схемы УСЭ и определенного режима его работы. Для ограничения различного рода перенапряжения значение емкости снабберного конденсатора может увеличиться до десятков мкФ в предельных режимах работы УСЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – Ч. 3. – С. 234–238.
2. 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.
3. 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.
4. Bespalov 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. – P. 143–147.

5. 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.
6. 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. – № 4. – С. 30–35.
7. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // Нелинейный мир. – 2011. – № 8. – С. 500–506.
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. – № 1. – С. 65–68.
9. 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. – № 6. – С. 396–404.
10. 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. – 2011. – С. 270–275.
11. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С. Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов // Труды VIII междунар. (XIX всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: 2 т. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 362–364.
12. 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.