

Имитационное моделирование защитных цепей транзисторного коммутационного аппарата постоянного напряжения

И.В. Черных

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург

Аннотация: Рассматривается имитационное моделирование защитных цепей транзисторного электронного аппарата постоянного тока. Приводятся схемы защиты. Анализируются уровни перенапряжений транзисторов. Сформулирован вывод о необходимости структуры защитных цепей.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, Simulink, коммутационный аппарат, перенапряжения, транзистор, защитная цепь, варистор.

В настоящее время одним из самых удобных методов исследования в различных областях науки и техники является имитационное моделирование. Этот метод используется в механике [1,2], материаловедении [3], электротехнике [4] и других, в том числе, и не технических областях науки и техники. Для имитационного моделирования в электротехнике и силовой электронике наиболее удобна программа *Simulink* совместно с библиотекой *SimPowerSystem*, входящая в состав пакета *MATLAB* [5,6].

В ближайшем будущем существует возможность замены электромеханических коммутационных аппаратов, как минимум, низкого напряжения до 1000 В, на полупроводниковые электронные устройства, поскольку они имеют значительно более высокие характеристики по быстродействию, управляемости и коммутационной стойкости. Это особенно важно для сетей постоянного напряжения, которые широко используются при питании электрического транспорта. Использование электронных устройств в силовых цепях дает возможность увеличить надежность работы, снизить расходы на эксплуатацию, снизить материалоемкость и габариты оборудования.

Серьёзной проблемой при разработке полупроводникового коммутационного устройства является защита транзистора от импульсных высоких напряжений, имеющих место при отключении нагрузки активно-индуктивного характера или питающей сети целиком, в случае короткого замыкания в нагрузке [7].

Без специальных средств защиты эти перенапряжения могут в десятки раз превышать номинальное напряжение [8], что может быть опасно как для самого транзисторного устройства, так и для других элементов в сети. Для уменьшения перенапряжений обычно используются демпфирующие цепи. Они, как правило, включают резисторы конденсаторы и варисторы, которые включаются параллельно коммутирующему элементу электрического аппарата, т.е. параллельно транзистору.

На рис.1 приведена упрощенная схема цепей защиты для исследования коммутационных перенапряжений в транзисторном электрическом аппарате. Она содержит несколько цепей, включенных параллельно, и состоящих из варисторов, конденсаторов и резисторов. Эти параллельные ветви с помощью ключей $K1 - K4$ могут быть подключены параллельно транзисторному электрическому аппарату, т.е. в сущности параллельно транзистору VT , причем, произвольным образом. Номер ключа K будет определять номер схемы защиты. Исследуемая схема подключается к источнику постоянного напряжения с помощью ключа $K5$. Индуктивность L_c и резистор R_c питающей сети включены последовательно с транзисторным коммутационным устройством. Именно они определяют запас электромагнитной энергии, которая выделяется в коммутационном аппарате и цепи защиты.

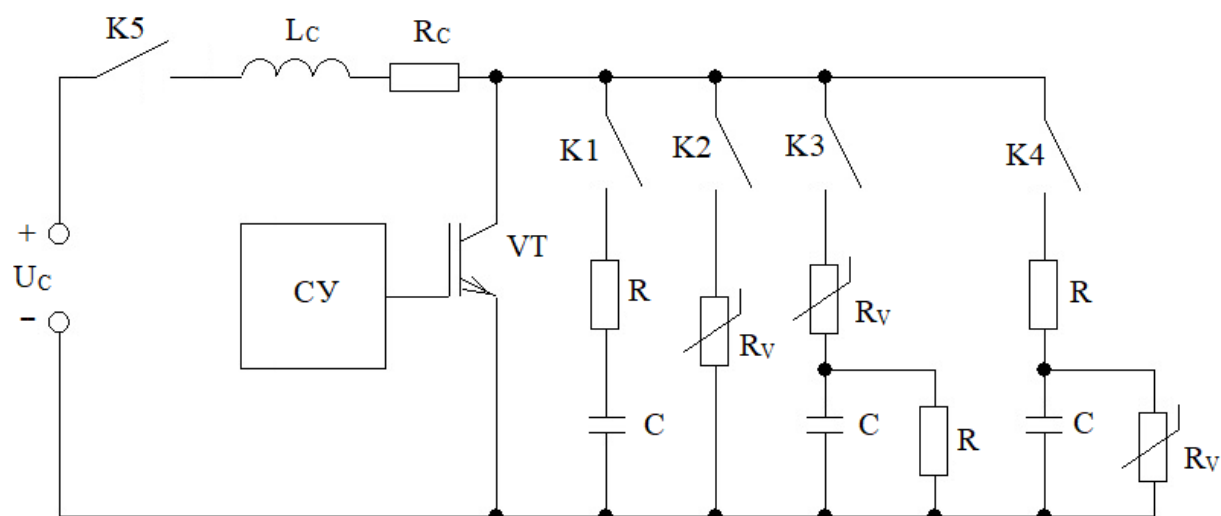


Рис. 1. – Схема цепей защиты

Для данной схемы в пакете *Simulink* была разработана имитационная модель. Схема модели показана на рис.2.

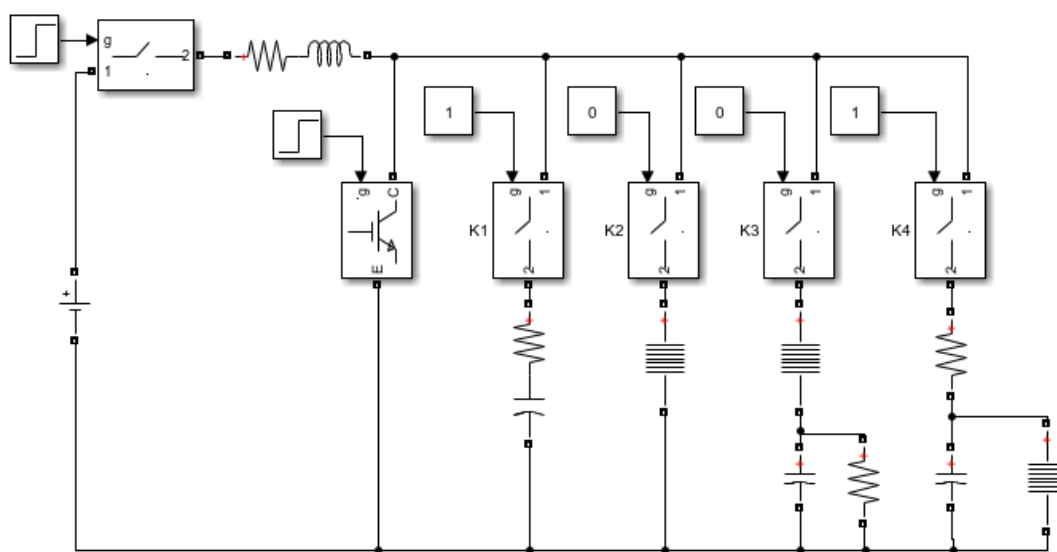


Рис. 2. – Схема модели

В модели аппарата использовалась модель транзистора [9], которая входит в библиотеку *SymPowerSystem*. Модель содержит также последовательно соединенные электронный ключ, резистор, индуктивность и источник постоянного тока. Нелинейная вольт-амперная характеристика варистора [10] задается формулой:

$$i = 250 \left(\frac{u}{1200} \right)^{25},$$

где u – напряжение варистора; i – ток варистора.

С использованием *Simulink*-модели был проведен ряд вычислительных экспериментов, позволяющих выбрать наилучшую схему защиты для транзисторного коммутационного аппарата.

На рис.3 показаны зависимости напряжений на транзисторе, с замкнутым ключом К1 (включена параллельная RC-цепь, а на рис.4 – зависимости скорости нарастания напряжения на транзисторном ключе при варьировании величины емкости конденсатора защитной RC-цепи и величины коммутируемого тока).

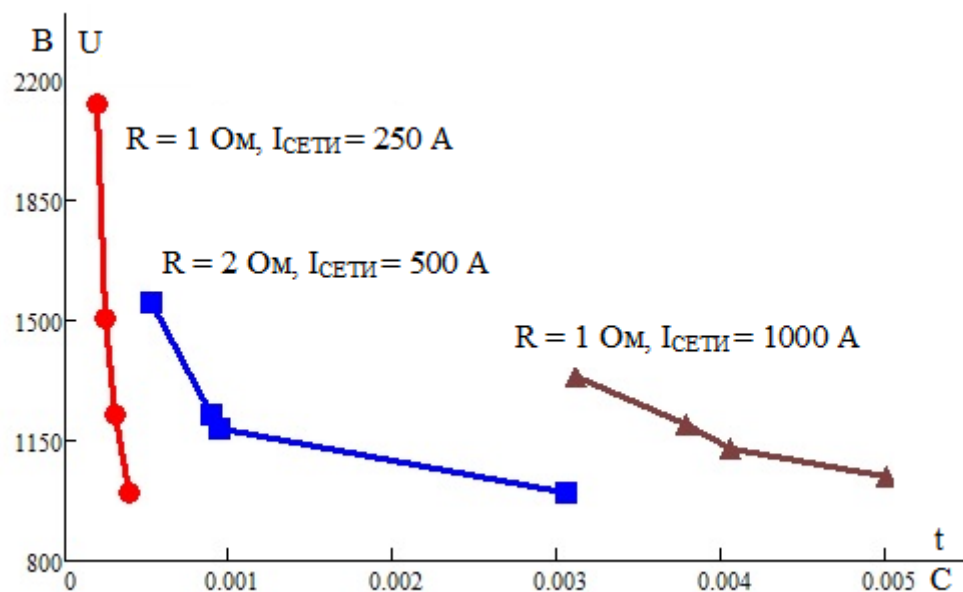


Рис. 3. – Напряжение на транзисторе при замкнутом ключе К1

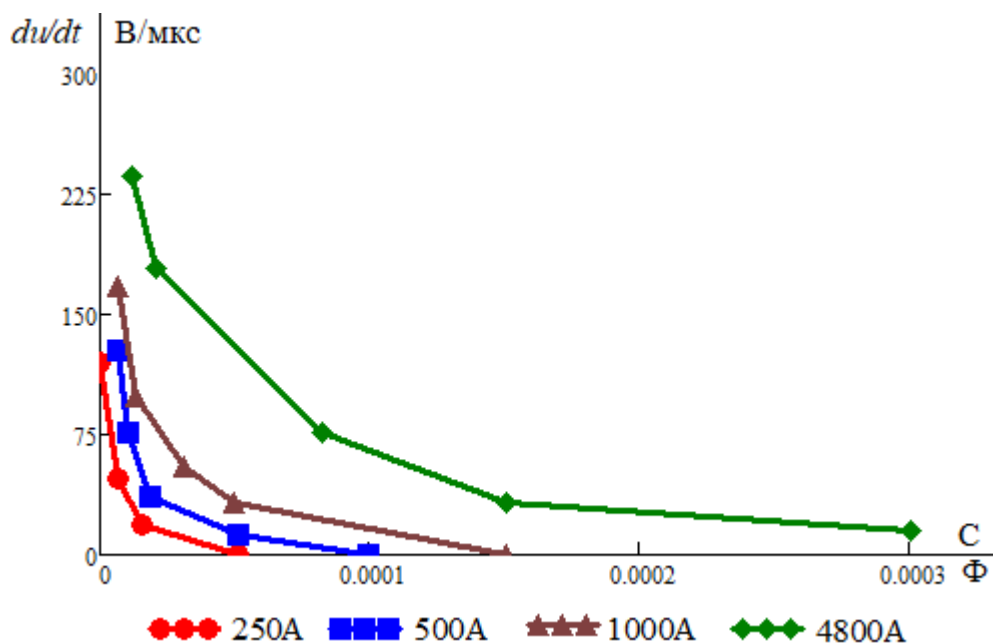


Рис. 4. – Скорость нарастания напряжения на транзисторе

На рис.5 даны зависимости перенапряжений на транзисторном ключе, зашунтированном варистором с номинальным напряжением 1200В (ключ К2 замкнут), от величины отключаемого тока $I_{\text{сети}}$ при разных ограничивающих токах варистора (ток на характеристике варистора, соответствующий точке резкого перегиба).

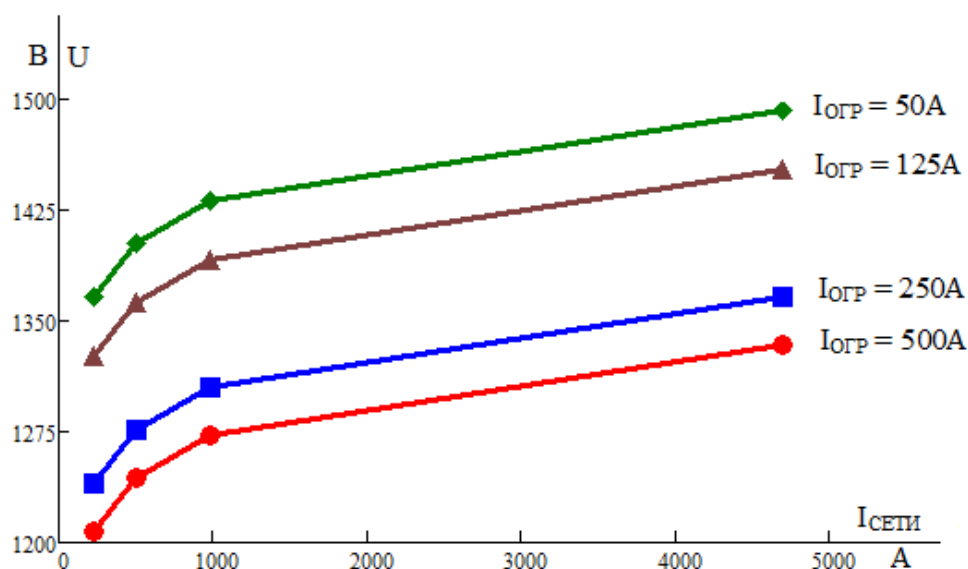


Рис. 5. – Перенапряжения на транзисторе при изменении тока сети

На рис. 6 показаны зависимости перенапряжений на транзисторе при

изменении сопротивления резистора шунтирующей цепи и емкости конденсатора № 3. На рис. 7 даны зависимости напряжения на транзисторном ключе для демпфирующей цепи № 4 при изменении емкости конденсатора шунтирующей цепи и изменении тока защиты варистора при его номинальном напряжении 1200 В.

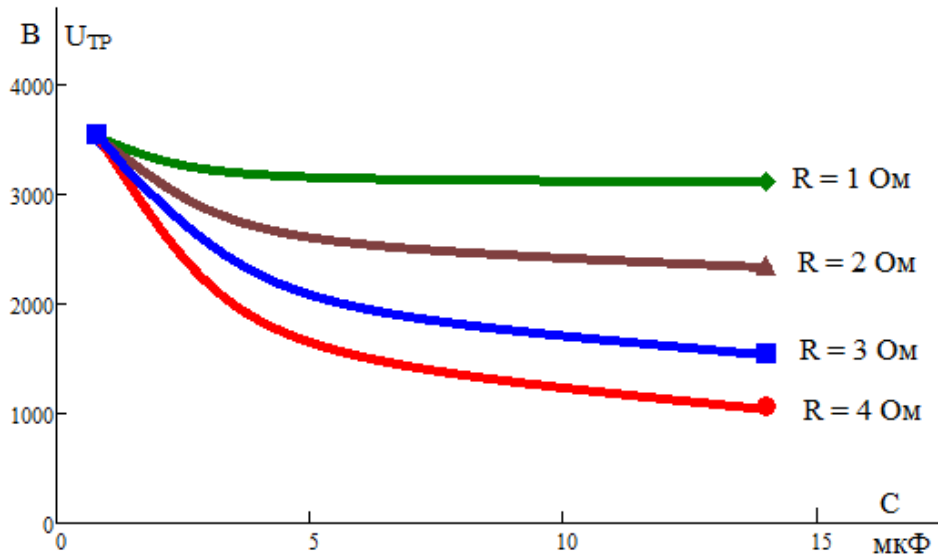


Рис. 6. – Перенапряжения на транзисторе при использовании демпфирующей цепи №3

Проведенные исследования показали, что демпфирующая параллельная RC-цепь, вместе с ограничением напряжения на варисторе, дает возможность уменьшить скорость нарастания напряжения на транзисторе. Это благоприятно сказывается на его динамической стабильности при коммутации тока. Кроме того варисторная шунтирующая цепь надежно ограничивает величину амплитуды напряжения на транзисторе.

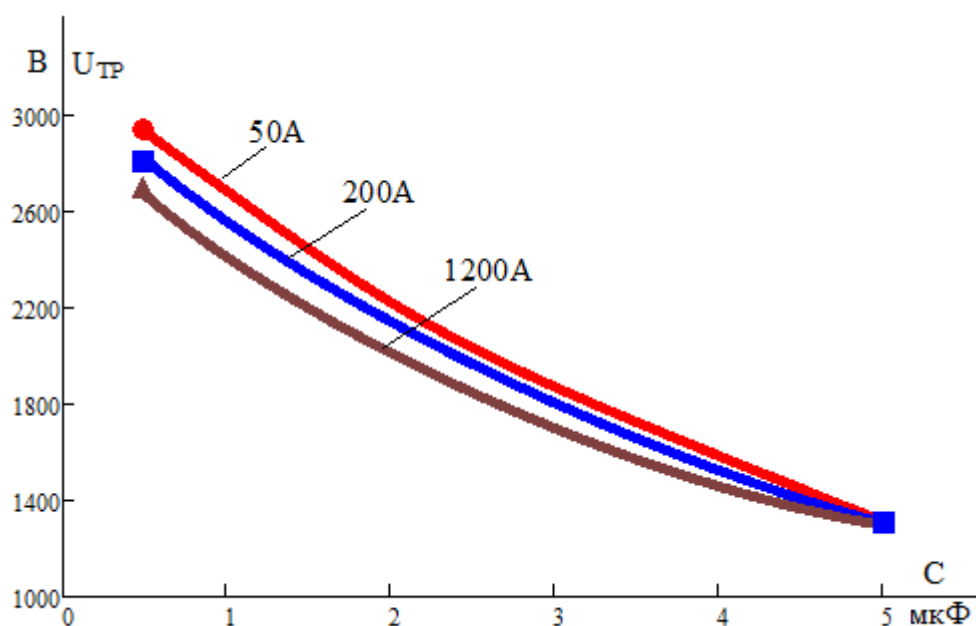


Рис. 7. – Перенапряжения на транзисторе при использовании демпфирующей цепи №4

Таким образом, в транзисторных электрических аппаратах целесообразно применять комбинированную схему защиты, включающую параллельную RC-цепь и варистор. Это имеет место при замкнутом состоянии ключей К1 и К2 (рис.1).

Полученные расчетные зависимости дают возможность подобрать оптимальные параметры защитных цепей в электронном коммутационном аппарате постоянного тока при заданных параметрах нагрузки, питающей сети, и известным значением отключаемого тока.

Литература

1. Сидоров М.В., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование работы трансмиссии трактора МТЗ-82 в среде Simulink // Инженерный вестник Дона, 2009, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709
2. Сидорова А.В., Степин П.И., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование колебаний центра масс колесной машины с помощью

- программы Simulink // Инженерный вестник Дона, 2020, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6395
3. Санамян Г. И. Имитационное моделирование операций упрочнения поверхностным пластическим деформированием // Инженерный вестник Дона, 2008, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2008/69
 4. Кралин А.А., Алтунин Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362
 5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2014. 288 с.
 6. Черных И.В. Simulink. Среда для создания инженерных приложений. // Под ред. Потемкина В.Г. - М: Диалог-МИФИ, 2004. – 247 с.
 7. Розанов Ю.К. Электрические и электронные аппараты. Учебник для вузов // Под ред. Ю. К. Розанова. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Информэлектро, 2001. - 420 с.
 8. Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T., Numerical Modeling and Very-Fast Transient Simulation of MOV Surge Arresters, Power and Energy // Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012. pp. 1-4.
 9. Mohan, N., Undeland T.M, Robbins W.P., Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995. 811 p.
 10. Герасимов В. Г., Князьков О. М., Краснопольский А. Е., Сухоруков В. В. Основы промышленной электроники // Под ред. Герасимова В. Г. - 3-е изд. - М: Высшая школа, 1986. - 336 с.

References

1. Sidorov M.V., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2009, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709
-



2. Sidorova A.V., Stepin P.I., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6395
3. Sanamyan G. I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2008, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2008/69
4. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362
5. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. M.: DMK Press, SPb: Piter, 2014. 288p.
6. Chernykh I.V. Simulink. Sreda dlya sozdaniya inzhenernykh prilozheniy [Environment for creating engineering applications]. Pod red. Potemkina V.G. M: Dialog-MIFI, 2004. 247 p.
7. Rozanov Yu.K. Elektricheskie i elektronnye apparaty [Electrical and electronic devices]. Uchebnik dlya vuzov. Pod red. Yu. K. Rozanova. 2-e izd., ispr. i dop. M.: Informelektro, 2001. 420 p.
8. Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T., Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012. pp. 1-4.
9. Mohan, N., Undeland T.M, Robbins W.P., Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995. 811 p.
10. Gerasimov V. G., Knyaz'kov O. M., Krasnopol'skiy A. E., Sukhorukov V. V. Osnovy promyshlennoy elektroniki [Fundamentals of Industrial Electronics] pod red. Gerasimova V. G. 3-e izd. M: Vysshaya shkola, 1986. 336 p.