

Расчет и оптимизация RC-демпфера для симистора

Симистор (Triac) представляет собой разновидность тиристора. Однако в отличие от тиристора симистор может пропускать переменный ток, поэтому симисторы давно нашли широкое применение в качестве коммутаторов и регуляторов переменного тока в различной аппаратуре бытового и промышленного назначения. В отличие от электромагнитных реле, которые используются для похожих целей, симисторы обеспечивают большую надежность, быстрое действие, а также меньший уровень помех, генерируемых при коммутации (открытие/закрытие). Благодаря своим превосходным характеристикам симисторы практически вытеснили электромагнитные реле во многих применениях. В немалой степени этому способствует регулярное снижение цен на данные компоненты.

Валентин ВОЛОДИН

Параметры симистора

Обычно симисторы используются для коммутации различных нагрузок, подключенных к сети переменного тока частотой 50 или 60 Гц. В дальнейшем будет рассматриваться именно этот случай применения симистора. Условное схемное обозначение симистора (рис. 1) получено путем совмещения двух встречно-параллельно включенных тиристорных, имеющих общий управляющий электрод.

В отличие от тиристора симистор является ключом переменного тока и может проводить ток в обоих направлениях. Поэтому его можно рассматривать как полупроводниковый прибор, который может быть переключен из закрытого состояния в открытое и наоборот при любой полярности на основных выводах [1].

Для того чтобы симистор работал долго и надежно, необходимо обеспечить ряд условий. В первую очередь речь идет об очевидных параметрах, ограничивающих максимальные режимы эксплуатации:

- $I_{T(RMS)}$ — максимальный действующий ток в открытом состоянии, А;
- I_{TSM} — максимальный импульсный (неповторяющийся) ток в открытом состоянии, А;
- di/dt — критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, А/мкс;
- V_{DRM}/V_{RRM} — максимальное повторяющееся напряжение, приложенное к симистору в закрытом состоянии, В;
- V_{DSM}/V_{RSM} — максимальное импульсное (неповторяющееся) напряжение, приложенное к симистору в закрытом состоянии, В;
- I_{GM} — максимальный ток затвора (управляющего электрода), А;

- $P_{G(AV)}$ — средняя мощность, рассеиваемая в затворе (управляющем электроде), Вт;
- T_j — максимальная рабочая температура кристалла, °С.

Превышение любого из вышеперечисленных параметров может привести к необратимому повреждению симистора.

Кроме уже перечисленных, надо учитывать ряд не менее важных параметров симистора, от которых зависит надежность процесса коммутации (переключения) электронного прибора из закрытого состояния в открытое и обратно:

- I_{GT} — открывающий постоянный ток управления, мА;
- I_L — ток включения, мА;
- I_H — ток удержания, мА;
- $(dV/dt)_{cr}$ — критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс;
- $(dV/dt)_c$ — критическая скорость нарастания коммутационного напряжения, В/мкс;
- $(dI/dt)_c$ — скорость снижения тока в открытом состоянии, А/мс.

Игнорирование этих параметров может привести к тому, что симистор не откроется в нужный момент либо откроется самопроизвольно в тот момент, когда это абсолютно не ожидается.

Применение RC-демпфера

Перечислим основные проблемы, связанные с коммутацией симистора [2, 3]:

- повторное самопроизвольное открытие симистора при смене полярности тока;
- самопроизвольное открытие симистора при быстром нарастании напряжения;
- самопроизвольное открытие или повреждение симистора при кратковременном превышении максимального напряжения.

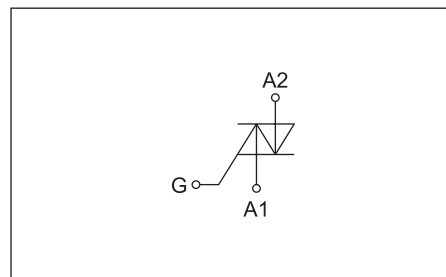


Рис. 1. Условное схемное обозначение симистора: G — управляющий электрод (затвор); A1 — анод 1 или основной вывод 1 (Main Terminal 1 — MT1); A2 — анод 2 или основной вывод 2 (Main Terminal 2 — MT2)

Рассмотрим подробнее причины возникновения перечисленных проблем, а также способы их преодоления.

Повторное самопроизвольное открытие симистора

Обычно симисторы используются для коммутации (включения/выключения) различных нагрузок в промышленных или бытовых сетях переменного тока. Когда симистор открыт и через него протекает ток, то в соответствующей области его полупроводниковой структуры накапливается избыточный заряд. Этот заряд исчезает за счет рекомбинации при уменьшении рабочего тока. Если убрать ток управления и затем достаточно медленно снижать рабочий ток, то избыточный заряд успеет рекомбинировать, а симистор перейдет в закрытое состояние после того, как рабочий ток достигнет уровня удержания I_H . При быстром снижении рабочего тока избыточный заряд может не успеть рекомбинировать. В этом случае,

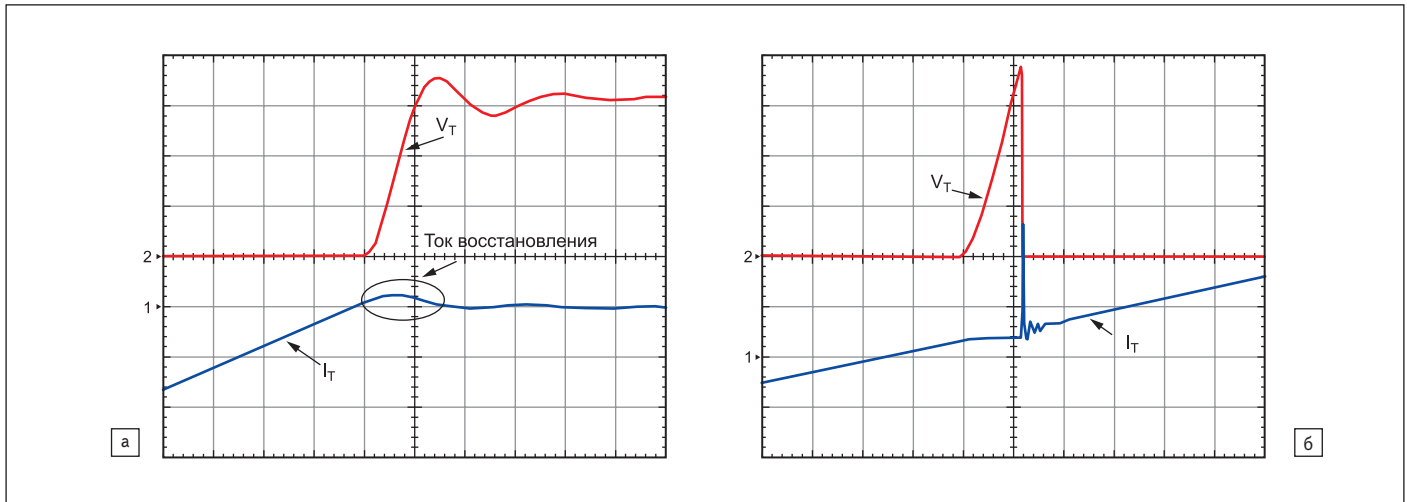


Рис. 2. Отключение симистора при индуктивной нагрузке: а) нормальное отключение; б) отключение с повторным включением

после смены полярности напряжения, через симистор будет протекать ток восстановления, вызванный процессом рассасывания избыточного заряда. Если при этом скорость нарастания обратного напряжения не превысит критического значения $(dV/dt)_c$, то симистор останется закрытым (рис. 2а). В противном случае симистор может самопроизвольно перейти в открытое состояние (рис. 2б) [1, 3].

Параметры $(dV/dt)_c$ и $(dI/dt)_c$ имеют взаимную функциональную зависимость. Чем выше критическое значение скорости нарастания коммутационного напряжения $(dV/dt)_c$, тем ниже должна быть скорость снижения тока $(dI/dt)_c$. Иногда в справочных данных производители приводят график зависимости скорости снижения тока от критической скорости нарастания коммутационного напряжения. Для примера на рис. 3 приведены графики такой зависимости для симисторов T405, T410, T435 производства фирмы ST [4].

Примечание. На рис. 3 значение скорости снижения тока указывается относительно значения $(dI/dt)_c$, соответствующего скорости нарастания коммутационного напряжения $(dV/dt)_c = 10 \text{ В/мкс}$.

Если через симистор протекает переменный действующий ток I_{RMS} синусоидальной формы, то скорость снижения тока можно найти по формуле (А/с):

$$dI/dt = 2\pi \times f \times I_{RMS} \times \sqrt{2}, \quad (1)$$

где f — частота тока, Гц.

Активная нагрузка

На рис. 4 изображен результат моделирования в программе LTspice процесса коммутации активной нагрузки симистором типа T405-600. Здесь графики напряжения сети $V(vn)$, напряжения на симисторе $V(vt)$ и тока нагрузки $I(R_{load})$ отмечены красным, зеленым и синим цветом соответственно.

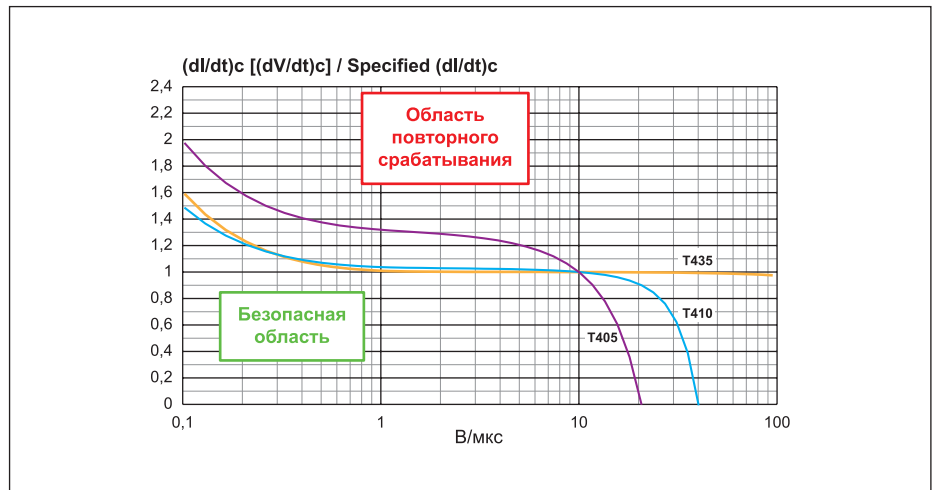


Рис. 3. Типовая зависимость скорости снижения тока от критической скорости нарастания напряжения $(dV/dt)_c$ для симисторов T405, T410, T435

В качестве активной нагрузки может выступать любой электропотребитель, обладающий активным сопротивлением. Например, это может быть электронагреватель, лампочка накаливания и т. п.

В течение времени, пока симистор открыт, через сопротивление нагрузки R_{load} протекает

ток $I(R_{load})$, совпадающий по фазе с напряжением сети $V(vn)$. После снятия тока управления и снижения тока нагрузки до нуля симистор закрывается. Так как напряжение сети совпадает по фазе с током нагрузки, после запирания симистора к нему прикладывается нулевое коммутационное напряжение $V(vt)$,

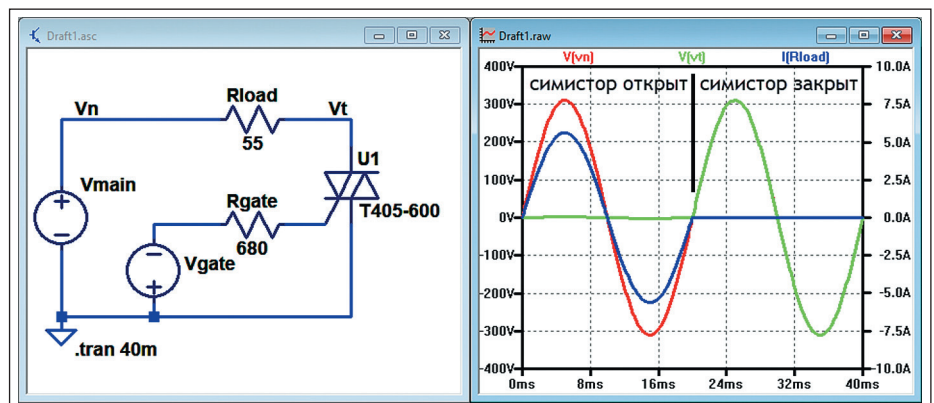


Рис. 4. Моделирование коммутации активной нагрузки симистором T405-600

которое затем нарастает. Скорость нарастания коммутационного напряжения можно найти по формуле (B/c):

$$dV/dt = 2\pi \times f \times V_{RMS} \times \sqrt{2}, \quad (2)$$

где V_{RMS} — действующее напряжение сети, В. Для примера воспользуемся формулами (1, 2) и рассчитаем значения скорости снижения тока и нарастания коммутационного напряжения для симистора T405, коммутирующего активную нагрузку. Нагрузка подключается к бытовой сети переменного тока напряжением $V_{RMS} = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц. Сопротивление нагрузки обеспечивает протекание через симистор максимального для него тока $I_{RMS} = 4$ А:

$$dI/dt = (2\pi \times 50 \times 4 \times \sqrt{2}) / 1000 = 1,78 \text{ А/мс},$$

$$dV/dt = (2\pi \times 50 \times 220 \times \sqrt{2}) / 1\,000\,000 = 0,098 \text{ В/мкс}.$$

Согласно справочным данным [4], отсутствие повторного открытия симистора гарантируется, если после снижения тока со скоростью 1,8 А/мс критическая скорость нарастания коммутационного напряжения не превышает 0,1 В/мкс. Расчет показывает, что в случае активной нагрузки данное условие соблюдается. Скорость нарастания коммутационного напряжения ниже критического значения не вызывает каких-то опасений с точки зрения повторного включения.

Активно-индуктивная нагрузка

Многие широко распространенные нагрузки, такие как обмотка соленоида, обмотка реле, обмотка электродвигателя и т.п., имеют активно-индуктивный характер. На рис. 5 изображен результат моделирования в программе LTspice процесса коммутации активно-индуктивной нагрузки симистором типа T405-600. Здесь графики напряжения сети $V(vn)$, напряжения на симисторе $V(vt)$ и тока нагрузки $I(R_{load})$ отмечены красным, зеленым и синим цветом соответственно.

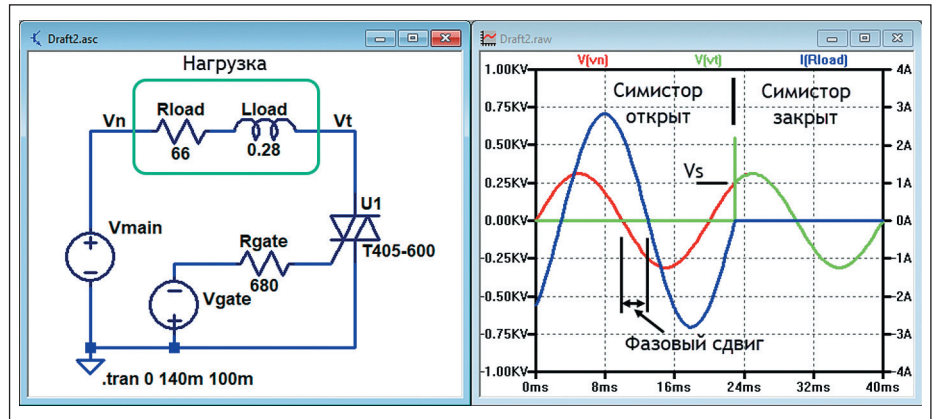


Рис. 5. Моделирование коммутации активно-индуктивной нагрузки симистором T405-600

Примечание. В реальности не существуют цепей, обладающих чисто активным, индуктивным или емкостным сопротивлением. Всегда можно говорить лишь о преобладании какого-либо одного или нескольких видов сопротивления. При этом другие виды присутствуют в качестве незначительных паразитных составляющих.

При активно-индуктивной нагрузке между напряжением, приложенным к нагрузке, и током, протекающим в ней, имеется фазовый сдвиг. Этот фазовый сдвиг может достигать 90° в случае чисто индуктивной нагрузки. Если известны величины активной R и индуктивной L составляющих нагрузки, то фазовый сдвиг можно найти по формуле:

$$\phi = \arctg(2\pi \times f \times L / R). \quad (3)$$

Наличие фазового сдвига означает, что после записания симистора к нему сразу будет приложено некоторое напряжение смещения V_S . Величину напряжения смещения можно рассчитать по формуле (B):

$$V_S = V_{RMS} \sqrt{2} \sin\phi. \quad (4)$$

Моделирование показывает (рис. 5), что к закрытому симистору кратковременно прикладывается напряжение, превышающее уровень V_S . Этот выброс происходит за счет

энергии, накопленной в индуктивности нагрузки L_{load} в процессе запираия симистора. Моделирование показывает, что импульс напряжения нарастает со скоростью 650 В/мкс и имеет амплитуду 550 В. Благодаря высокой скорости нарастания коммутационного напряжения реальный симистор будет гарантированно открыт повторно.

Повторное открытие симистора можно предотвратить с помощью вспомогательной цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора C_S и резистора R_S . Эта вспомогательная цепь включается параллельно симистору (рис. 6) и называется демпферной RC-цепочкой. Демпферная цепь позволяет снизить скорость нарастания коммутационного напряжения. В современной технической литературе демпферную RC-цепочку часто называют RC-снаббером (snubber), или просто снаббером.

Длительность коммутации симистора на несколько порядков меньше длительности периода колебания в сети переменного тока частотой 50 или 60 Гц. Это позволяет упростить расчет RC-демпера, считая, что напряжение сети неизменно и равно по величине напряжению смещения V_S . В этом случае минимальную емкость конденсатора демпера можно рассчитать по формуле:

$$C_S \geq 1/L(V_S/(dV/dt))^2. \quad (5)$$

Конденсатор демпера C_S , вместе с индуктивностью нагрузки L_{load} создает колебательный контур, в котором после закрытия симистора могут возникать высокочастотные затухающие колебания. Однако во время этих колебаний скорость изменения напряжения не превышает критического значения, и поэтому симистор останется закрытым. Несмотря на это, за счет колебательного процесса на симистору прикладывается повышенное коммутационное напряжение V_M . По своей величине напряжение V_M может в 2 раза превысить величину напряжения смещения V_S . Это требует использования более высоковольтного симистора. Величину V_M можно снизить,

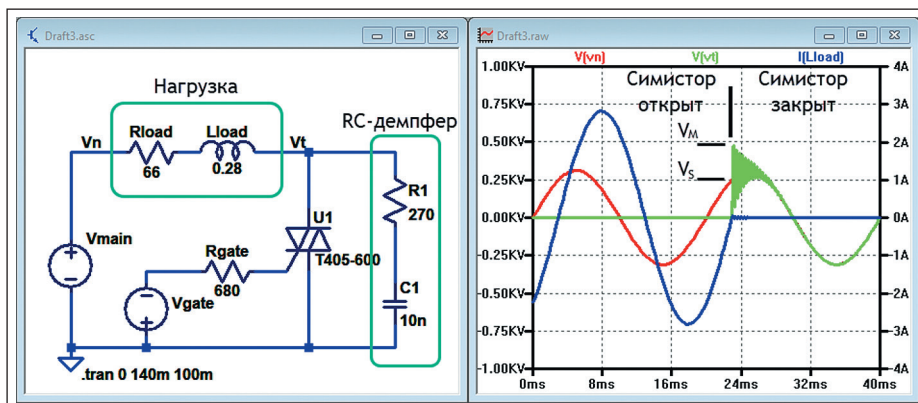


Рис. 6. Использование RC-демпера совместно с симистором

увеличив потери в колебательном контуре, которые определяются суммарным активным сопротивлением:

$$R = R_{load} + R_S.$$

Сопротивление нагрузки R_{load} не может быть изменено. Поэтому увеличивать потери можно только за счет повышения сопротивления демпферного резистора R_S . Критическую величину резистора R_S , которая обеспечивает полное подавление колебаний, можно рассчитать по формуле (Ом):

$$R_S = 2\sqrt{L_{load}/C_S} - R_{load} \quad (6)$$

При использовании такого резистора пиковая величина коммутационного напряжения V_M на тиристоре будет равна напряжению смещения V_S . Для меньших значений суммарного сопротивления R максимальную величину коммутационного напряжения можно рассчитать по формуле (В):

$$V_M = V_S((1/e^{0,5\beta \times T}) + 1). \quad (7)$$

Коэффициент затухания β определяет относительное затухание свободных колебаний в контуре:

$$\beta = R/2L_{load} \quad (8)$$

Собственную частоту контура можно рассчитать по формуле (Гц):

$$F_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}). \quad (9)$$

Частота затухающих колебаний определяется формулой (Гц):

$$F = \sqrt{(2\pi F_0)^2 - \beta^2}/2\pi. \quad (10)$$

Период затухающих колебаний определяется формулой (с):

$$T = 1/F. \quad (11)$$

Самопроизвольное открытие симистора при быстром нарастании напряжения

В сети постоянно присутствуют импульсные напряжения, вызываемые молниевыми разрядами и процессами коммутации. Вероятные параметры этих импульсных напряжений оговариваются межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013.

Быстрые изменения напряжения, приложенные к закрытому симистору, проникая через емкость между анодом (А2) и управляющим электродом (G), могут создавать ток управления, достаточный для его самопроизвольного открытия. Максимальная скорость нарастания внешнего напряжения, которая не вызывает открытия симистора, называется критической скоростью нарастания напряжения (dV/dt)_{cr}.

Самопроизвольное открытие симистора из-за превышения критической скорости нарастания напряжения (dV/dt)_{cr} не приводит к его повреждению и поэтому не опасно для симистора. Однако подобные ложные срабатывания могут вызывать проблемы с функциональностью оборудования, в котором установлен симистор.

RC-демпфер увеличивает устойчивость симистора к самопроизвольному открытию, при быстром нарастании напряжения. Причем чем ниже величина резистора R_S , тем выше устойчивость.

Повреждение симистора при кратковременном превышении максимального напряжения

В ранее перечисленных случаях могут возникнуть условия, когда к симистору, подключенному к сети и имеющему необходимый запас по напряжению, может быть приложено напряжение, превышающее максимально допустимое. Прежде всего, подобное повышение напряжения может быть вызвано длительными переходными процессами в сети, связанными с естественными или аварийными событиями. Кроме этого, скачки напряжения могут быть получены при коммутации нагрузки, имеющей индуктивную составляющую (активно-индуктивной нагрузки). Если при этом напряжение превысит максимально допустимый уровень V_{DSM}/V_{RSM} то симистор с большой вероятностью будет необратимо поврежден.

Как и в предыдущих случаях, использование RC-демпфера увеличивает устойчивость симистора к кратковременным повышениям напряжения. Это объясняется тем, что внешнее импульсное напряжение прикладывается к симистору через делитель сопротивления нагрузки, а нижнее — резистор R_S . Причем чем ниже величина резистора R_S , тем выше устойчивость. Однако, ограничивая скорость нарастания напряжения, RC-демпфер увеличивает вероятность его пробоя в случае перенапряжения. Поэтому RC-демпфер нельзя рассматривать как основное средство защиты от повышенного напряжения. Он может использоваться лишь в качестве дополнительной меры, совместно со специальным ограничителем напряжения — варистором.

Выбор минимальной величины сопротивления демпфера

Поскольку при снижении величины резистора R_S устойчивость симистора к скачкам напряжения увеличивается, то логично было бы просто заменить его перемычкой. Однако исключение резистора R_S может привести к повреждению симистора при включении. Объясняется это тем, что первоначально при включении симистора основ-

ной ток начинает протекать вблизи области управления, а затем область проводимости распространяется на всю площадь структуры. Соответственно, если скорость нарастания тока превысит критическое значение dI/dt , это вызовет локальный перегрев и тепловой пробой полупроводниковой структуры симистора [5]. Основным источником быстро нарастающего тока является RC-демпфер (рис. 6). Если конденсатор демпфера C_S заряжен, то после включения симистора он разрядится через последовательно включенные симистор и резистор R_S . При этом резистор R_S должен иметь достаточно высокое сопротивление, позволяющее ограничить амплитуду и скорость нарастания разрядного тока.

Примерные минимальные величины резистора RC-демпфера, в зависимости от максимального действующего тока симистора, приведены в таблице 1 [2, 3]. При этом максимальное сопротивление RC-демпфера рассчитывается по формуле (6).

Таблица 1. Минимальное сопротивление RC-демпфера

Номинальное напряжение, В	Действующее значение тока симистора, А						
	≤1	≤45	≤90	≤180	≤450	≤900	≤1800
≤230	620	47	33	22	12	6,8	6,8
≤400	—	82	56	33	22	15	12
≤500	—	120	68	39	27	18	15
≤690	—	—	—	47	33	22	22

Данные из таблицы 1 для номинального напряжения 230 В хорошо аппроксимируются степенной функцией:

$$R_S = 613,2144 \times I_{RMS}^{-0,6528717} \text{ Ом}. \quad (12)$$

Пример расчета RC-демпфера

Рассчитаем RC-демпфер для симистора, коммутирующего активно-индуктивную нагрузку, подключенную к бытовой сети переменного тока напряжением $V_{RMS} = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц.

Нагрузка имеет следующие параметры:

- активное сопротивление нагрузки: $R_{load} = 66$ Ом;
- собственная индуктивность нагрузки: $L_{load} = 0,28$ Гн.

Примечание. Индуктивность нагрузки измеряется на частоте 1–10 кГц, так как обычно в этом диапазоне находится собственная частота резонанса демпфера и нагрузки.

Рассчитаем модуль сопротивления активно-индуктивной нагрузки:

$$z = \sqrt{R_{load}^2 + (2\pi \times f \times L_{load})^2} = \sqrt{66^2 + (2\pi \times 50 \times 0,28)^2} = 110 \text{ Ом}.$$

Зная напряжение сети и сопротивление нагрузки, рассчитаем ток нагрузки по закону Ома:

$$I_{RMS} = V_{RMS}/z = 220/110 = 2 \text{ А}.$$

Таблица 2. Параметры симистора T405-600

Параметр	Единица измерения	Величина	Примечание
I_T	А	4	
V_{DRM}/V_{RRM}	В	600	
V_{DSM}/V_{RSM}	В	700	Обычно на 100 В выше V_{DRM}/V_{RRM}
I_H	мА	10	
$(dV/dt)_{cr}$	В/мкс	20	
$(dI/dt)_c$	А/мс	0,9	Если $(dV/dt)_c = 10$ В/мкс

Для такого тока подойдет симистор T405-600 производства фирмы STMicroelectronics [4], рассчитанный на максимальный действующий ток $I_T = 4$ А. Основные параметры симистора перечислены в таблице 2.

Определим скорость снижения тока по формуле (1):

$$dI/dt = 2\pi \times f \times I_{RMS} \times \sqrt{2} = 2\pi \times 50 \times 2 \times \sqrt{2} = 888 \text{ А/с} = 0,888 \text{ А/мс.}$$

Так как нагрузка активно-индуктивная, между напряжением и током имеется фазовый сдвиг. Величину этого фазового сдвига можно рассчитать по формуле (3):

$$\varphi = \arctg(2\pi \times f \times L/R) = \arctg(2\pi \times 50 \times 0,28)/66 = 53^\circ.$$

Определим напряжение смещения по формуле (4):

$$V_S = V_{RMS} \sqrt{2} \times \sin \varphi = 220 \sqrt{2} \times \sin 53^\circ = 249 \text{ В.}$$

Чтобы исключить повторное открытие симистора T405-600, скорость нарастания коммутационного напряжения необходимо ограничить на уровне не более 10 В/мкс. В этом случае минимальную емкость конденсатора демпфера можно рассчитать по формуле (5):

$$C_S \geq 1/L_{load} (V_S / (dV/dt))^2 = 1/0,28 (249 / (10 \times 10^6))^2 = 2,24 \times 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Выберем стандартный конденсатор емкости $C_S = 3,3$ нФ.

По формуле (6) рассчитаем максимальную величину сопротивления демпфера R_S :

$$R_{Smax} = 2\sqrt{L_{load} / C_S} - R_{load} = 2\sqrt{0,28 / (3,3 \times 10^{-9})} - 66 = 18 \text{ кОм.}$$

Минимальное сопротивление демпфера найдем при помощи формулы (12):

$$R_{Smin} = 613,2144 \times I_{RMS}^{-0,6528717} = 613,2144 \times 4^{-0,6528717} = 248 \text{ Ом.}$$

Для того чтобы увеличить устойчивость симистора к перенапряжениям, выберем минимальное стандартное значение сопротивления демпфера $R_S = 270$ Ом. В случае использова-

ния минимального сопротивления R_S к закрытому симистору за счет колебательного процесса будет приложено повышенное напряжение V_M . Чтобы определить перенапряжение, рассчитаем коэффициент затухания свободных колебаний по формуле (8):

$$\beta = R/2L_{load} = (66+270)/(2 \times 0,28) = 600.$$

Собственную частоту контура можно считать по формуле (9):

$$F_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/(2\pi\sqrt{0,28 \times 3,3 \times 10^{-9}}) = 5236 \text{ Гц.}$$

Частота затухающих колебаний определяется формулой (10):

$$F = \sqrt{(2\pi \times F_0)^2 - \beta^2} / 2\pi = \sqrt{(2\pi \times 5236)^2 - 600^2} / 2\pi = 5235 \text{ Гц.}$$

Соответственно период затухающих колебаний определяется по формуле (11):

$$T = 1/F = 1/5235 = 1,91 \times 10^{-4} \text{ с.}$$

Теперь рассчитаем максимальную величину коммутационного напряжения по формуле (7):

$$V_M = V_S ((1/e^{0,5 \times \beta \times T}) + 1) = 249 ((1/e^{0,5 \times 600 \times 1,91 \times 10^{-4}}) + 1) = 484 \text{ В.}$$

Максимальная величина коммутационного напряжения не вызывает опасений, так как не превышает максимальное рабочее напряжение симистора V_{DRM}/V_{RRM} .

Моделирование RC-демпфера

При выборе наилучшего демпфера необходимо исследовать его поведение во всех возможных условиях эксплуатации. Аналитически (путем расчетов) такое исследование провести достаточно сложно. Намного проще искать наилучшее решение при помощи симулятора электронных схем.

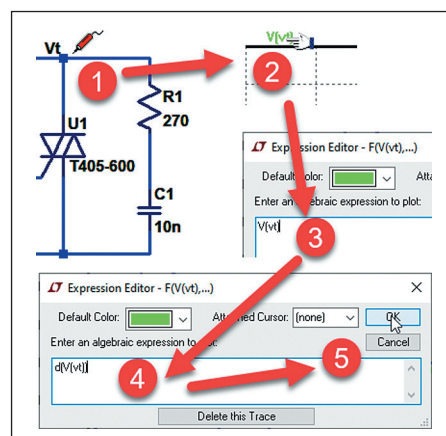


Рис. 7. Настройка графика, выводимого в окно плоттера

Например, при помощи симулятора LTspice. При этом расчетные формулы, предложенные в этой статье, можно использовать для предварительного расчета RC-демпфера.

Моделирование условий повторного открытия симистора

На рис. 7 изображен результат моделирования скорости нарастания коммутационного напряжения в зависимости от величины демпферного сопротивления R_S . Модель симистора T405-600 можно найти на сайте производителя. Цель моделирования заключается в том, чтобы отсеять те величины сопротивления R_S , которые приводят к слишком большой скорости нарастания коммутационного напряжения $(dV/dt)_c > 10$ В/мкс, вызывающей повторное открытие симистора. Изменение величины сопротивления R_S производится при помощи директивы .STEP:

```
.step param rs list 270 560 1.1k 2.2k 4.3k 8.2k 18k
```

Сеанс моделирования включает несколько циклов повторения, где в начале каждого цикла сопротивление R_S последовательно принимает значения из списка {270 560 1.1k 2.2k 4.3k 8.2k 18k}.

После запуска моделирования окно схемного редактора симулятора LTspice уменьшится в 2 раза и на освободившееся место будет вставлено пока пустое окно плоттера. Для настройки вывода в окно плоттера необходимо сделать пять последовательных шагов, изображенных на рис. 7:

- подвести курсор к узлу Vt и, как только тот превратится в щуп, щелкнуть левой кнопкой мышки. После этого графики напряжения $V(vt)$ будут выведены в окно плоттера;
- в окне плоттера щелкнуть правой кнопкой мышки по названию графика $V(vt)$. После этого откроется окно **Expression Editor** (редактор выражений);
- в окне **Expression Editor** вместо $V(vt)$ записать $d(V(vt))$. Эта запись выведет в окно плоттера производную от напряжения $V(vt)$;
- нажать кнопку **ОК**.

Результаты всех циклов повторения выведутся на общий график в виде веера цветных линий. Чтобы разобрать этот веер, необходимо сначала прикрепить курсор к графику. Для этого щелкаем левой кнопкой мышки по названию графика — $d(V(vt))$. В окне просмотра появляется курсор в виде пересечения двух пунктирных линий. Чтобы лучше видеть курсор, можно выключить сетку в окне плоттера при помощи комбинации клавиш **Ctrl+G**. Курсор указывает на актуальный график. Выбрать другой график можно при помощи клавиш управления курсором на клавиатуре: **↑** и **↓**. Таким образом выбираем график скорости нарастания напряжения, не превышающий уровня 10 В/мкс, но ближайший к нему.

Для идентификации графика, отмеченного курсором, подводим к нему указатель мыши, пока не появится номер курсора, затем давим правую кнопку мышки, что вызывает окно **Cursor Step Information**. В этом окошке указан номер шага и значение параметра $R_S = 4,3 \text{ кОм}$ (рис. 8).

Моделирование показывает, что скорость нарастания коммутационного напряжения (dV/dt) с превышает допустимое значение 10 В/мкс в случае, если $R_S > 4,3 \text{ кОм}$ (график розового цвета).

Результаты моделирования зависят от того, насколько корректно модель симистора T405-600 имитирует процесс обратного восстановления закрытого состояния. К сожалению, в справочных данных производители не приводят зависимости тока обратного восстановления от скорости снижения тока (dI/dt). Поэтому экспериментальное измерение указанной зависимости и использование ее в модели увеличит достоверность моделирования.

Моделирование условий быстрого нарастания напряжения

Ранее в статье перечислялись случаи, приводящие к быстрому нарастанию напряжения на закрытом симисторе. В этом плане наибольшую опасность представляют скачки напряжения, вызванные ударами молнии в линии электропередачи. Внутри зданий напряжение такого всплеска может достигать 6 кВ за $1\text{--}10 \text{ мкс}$. Очевидно, что никакая разумная демпферная цепочка не в состоянии подавить подобный всплеск до допустимого уровня $600\text{--}700 \text{ В}$. Поэтому обычно демпферная цепочка используется совместно с варистором, включенным параллельно сетевому вводу устройства. Варистор, типичный для однофазной сети 220 В , поглощает энергию импульса и фиксирует максимальное напряжение на уровне $600\text{--}650 \text{ В}$.

На рис. 9 изображен результат моделирования быстрого нарастания напряжения $V(vt)$ на закрытом симисторе. Симистор находится в непроводящем состоянии и поэтому из модели исключен. Источник V_{main} генерирует короткий импульс напряжения величиной 650 В и длительностью 50 мкс .

Изменение величины сопротивления R_S производится при помощи директивы .STEP:

```
.step param rs list 270 560 1.1k 2.2k 4.3k
```

Величины 8.2k и 18k исключены на предыдущем этапе моделирования.

В процессе моделирования выяснилось, что конденсатора C_S емкостью $3,3 \text{ нФ}$ недостаточно для снижения напряжения на симисторе до безопасного уровня. Поэтому величина демпферного конденсатора C_S была увеличена до 10 нФ . Это позволило опустить пик напряжения на симисторе ниже уровня максимального импульсного неповто-

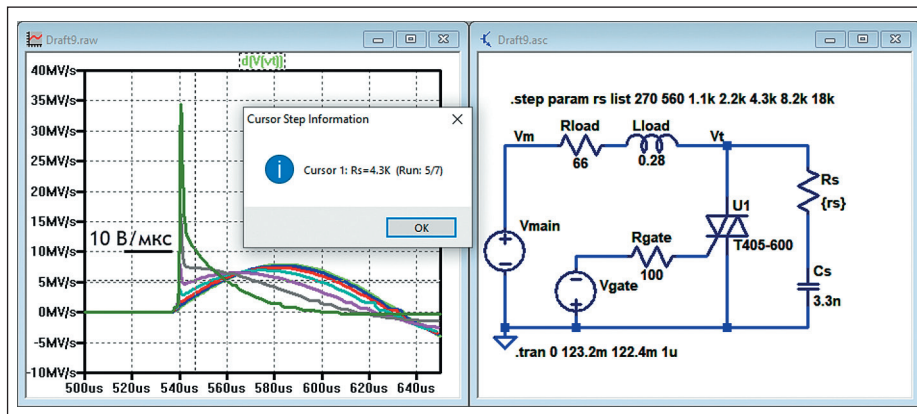


Рис. 8. Моделирование условий повторного открытия симистора

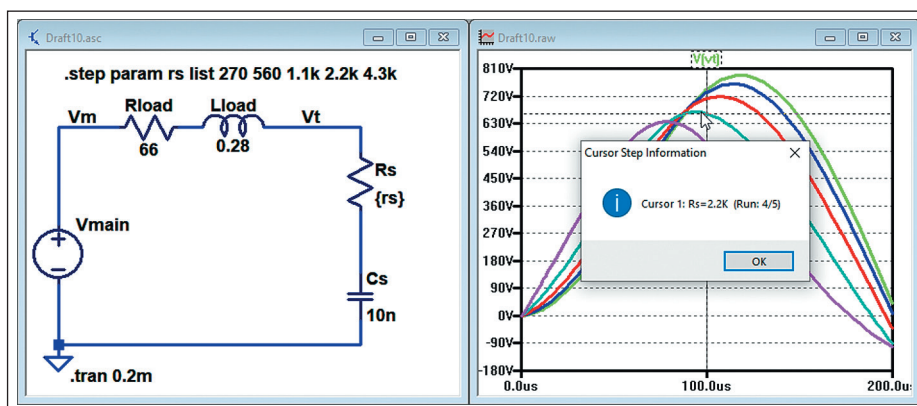


Рис. 9. Моделирование быстрого нарастания напряжения на симисторе

ряющегося напряжения в закрытом состоянии $V_{DSM}/V_{RSM} = 700 \text{ В}$. Условие соблюдается в случае, если сопротивление демпферного резистора R_S не ниже $2,2 \text{ кОм}$.

В результате моделирование позволило уточнить величину демпферного конденсатора ($C_S = 10 \text{ нФ}$) и выбрать оптимальный диапазон величин для демпферного резистора ($R_S = 2,2\text{--}4,7 \text{ кОм}$).

Производители обычно рекомендуют использовать минимальную величину демпферного резистора. Это позволяет гарантированно избежать проблемы повторного отпирания симистора. Однако при этом требуется использование более высоковольтного симистора. Кроме того, повышается вероятность пробоя симистора при перенапряжениях в сети, вызванных молниевыми разрядами и переходными процессами.

Бездемперные симисторы

В последнее время получили широкое распространение бездемперные симисторы. В данном случае речь идет об электронных приборах ACS/ACST, выпускаемых фирмой ST [7, 8]. ACS/ACST — это симисторные переключатели переменного тока, которые отличаются повышенной устойчивостью к нарастающему напряжению. Кроме того, ACS/ACST имеют ограничитель напряже-

ния, который защищает прибор от перенапряжений, вызываемых индуктивной нагрузкой или переходными процессами в питающей сети переменного тока. По заявлениям производителя, приборы ACS/ACST могут использоваться без внешних защитных цепей.

Примечание. С более подробными примерами практического использования симулятора LTSpice можно будет познакомиться в книге, которая выйдет в начале 2022 года.

Литература

1. Евсеев Ю. А., Крылов С. С. Симисторы и их применение в бытовой аппаратуре. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Богомяков А. А., Голов Н. А., Евсеев Ю. А., Ковалев Ф. И., Кубарев Л. П., Поташников М. Ю., Усачев В. А. Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.
3. AN437. RC snubber circuit design for TRIACs. STMicroelectronics, 2007.
4. T4 series. Datasheet. STMicroelectronics, 2016.
5. Тиристоры. Справочник. М.: Радио и связь, 1990.
6. AN4363. How to select the Triac, ACS, or ACST that fits your application. STMicroelectronics, 2015.
7. AN1172. A logic-level transient-voltage protected AC switch. STMicroelectronics, 2006.