

**Вступление**

Когда симистор (TRIAC) управляет индуктивными нагрузками, напряжение сети и ток нагрузки не совпадают по фазе. Чтобы ограничить наклон повторно приложенного напряжения и обеспечить правильное отключение симистора, разработчик обычно использовал демпферную схему, подключенную параллельно симистору. Эту схему также можно использовать для повышения устойчивости симистора TRIAC к быстрым переходным напряжениям.

Предметом данной статьи является, прежде всего, анализ функций демпфирующей схемы и предложение метода проектирования демпфирующей схемы с целью улучшения коммутации при выключении.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Функции демпферной цепи и недостатки.	2
1.1. Улучшение выключения.	2
1.1.1 Напоминание об отключении симистора	2
1.1.2 Преимущество демпфирующей схемы при выключении симистора	3
1.2. Ограничение перенапряжения при выключении	4
1.3. Устойчивость к быстрым переходным процессам напряжения	5
1.4. Напряжение включения из-за разряда демпферной цепи	5
2. Как разработать схему демпфера для улучшения выключения	6
2.1. Переходная характеристика последовательной цепи RLC	6
2.2. Конструкция демпферной цепи RC	8
2.2.1 Требуется ли демпферная цепь?	8
2.2.2 Конструкция демпфирующей цепи резистора и конденсатора.	9
3. Заключение	13
Приложение А. Объяснение переходной характеристики последовательной RLC цепи.	14

1 Функции демпферной цепи и недостатки

1.1 Улучшение выключения

1.1.1 Напоминание об отключении TRIAC

Когда симистор переходит из включенного состояния в выключенное, ток проходит через ноль, и напряжение питания мгновенно повторно прикладывается к структуре. В определенных условиях компонент не может заблокировать это напряжение и поэтому самопроизвольно включается.

Действительно, симистор можно сравнить с двумя тиристорами, установленными спина к спине и соединенными с одной зоной управления. Для срабатывания двух тиристоров область управления перекрывает две области проводимости.

Во время проводимости в конструкцию вводится определенное количество зарядов. Эти заряды исчезают в результате рекомбинации во время уменьшения тока и рассасываются током обратного восстановления после выключения (см. рис. 1). Тем не менее, избыток заряда остается, особенно в соседних областях затвора, который может вызвать срабатывание другой зоны проводимости, когда сетевое напряжение повторно прикладывается к симистору (см. рис. 2).

Рис. 1. Отключение симистора при индуктивной нагрузке - нормальное отключение

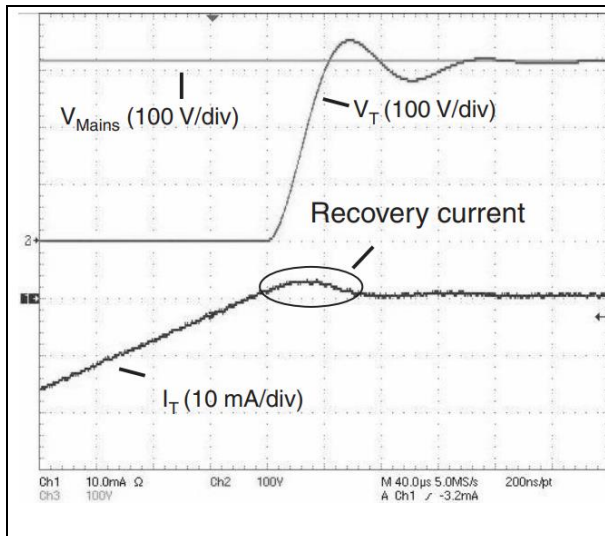
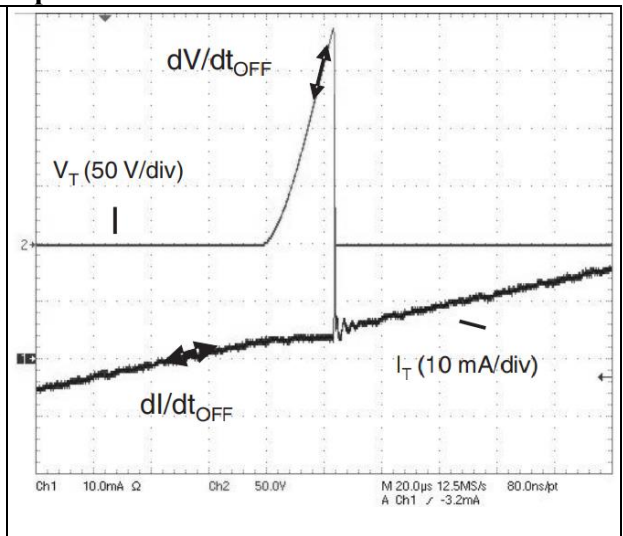


Рис. 2. Отключение симистора при индуктивной нагрузке - ложное срабатывание.



Ложное срабатывание зависит от:

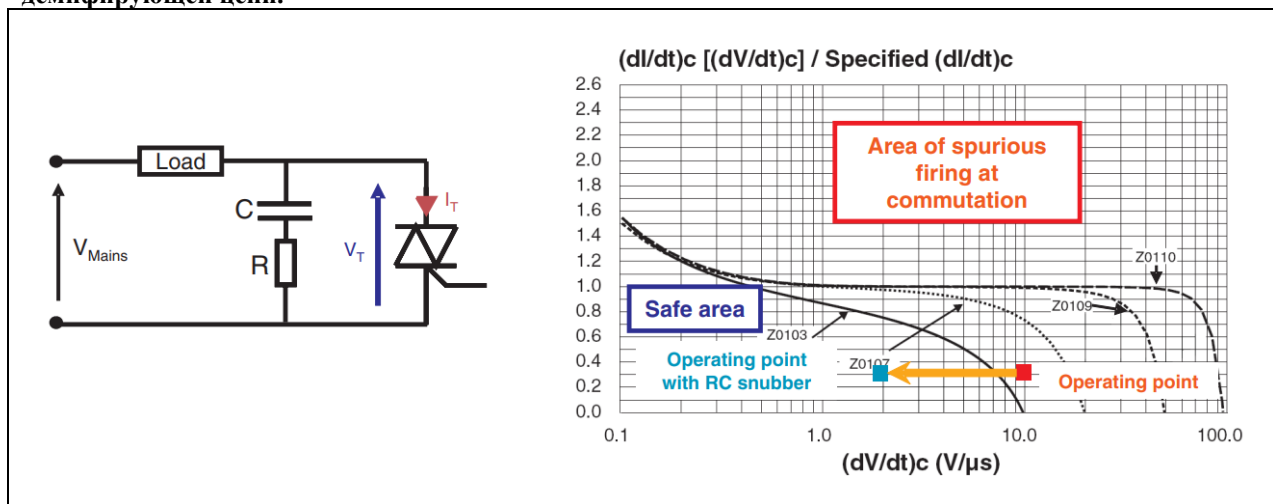
- Скорость снижения тока, называется dI/dt выключения или dI/dt_{OFF} . Этот параметр определяет величину заряда, который остаётся при снижении тока до нуля, и который может быть введен в область затвора или в противоположный тиристор;
- Скорость нарастания повторно приложенного напряжения, называемая dV/dt при выключении или dV/dt_{OFF} . Этот параметр определяет емкостной ток, который может быть введен через затвор.

1.1.2 Преимущество демпферной цепи при выключении симистора

Поведение симистора при выключении характеризуется графической зависимостью критической скорости уменьшения коммутируемого тока в открытом состоянии ($(dI/dt)_c$) и критической скорости нарастания коммутационного напряжения в закрытом состоянии ($(dV/dt)_c$) (см. рис. 3). Эти параметры указаны для максимальной рабочей температуры перехода (наихудший случай).

На практике форма волны тока и, следовательно, крутизна спада тока определяется нагрузкой. После этого пользователь может ограничить только крутизну повторно приложенного напряжения. Действительно, подключив параллельно симистору демпферную цепочку, можно увеличить время отклика схемы и, таким образом, уменьшить dV / dt_{OFF} (см. рис. 3).

Рис. 3. Кривая $(dI / dt)_c$ в зависимости от $(dV / dt)_c$ для стандартных симисторов Z01 и влияние демпфирующей цепи.

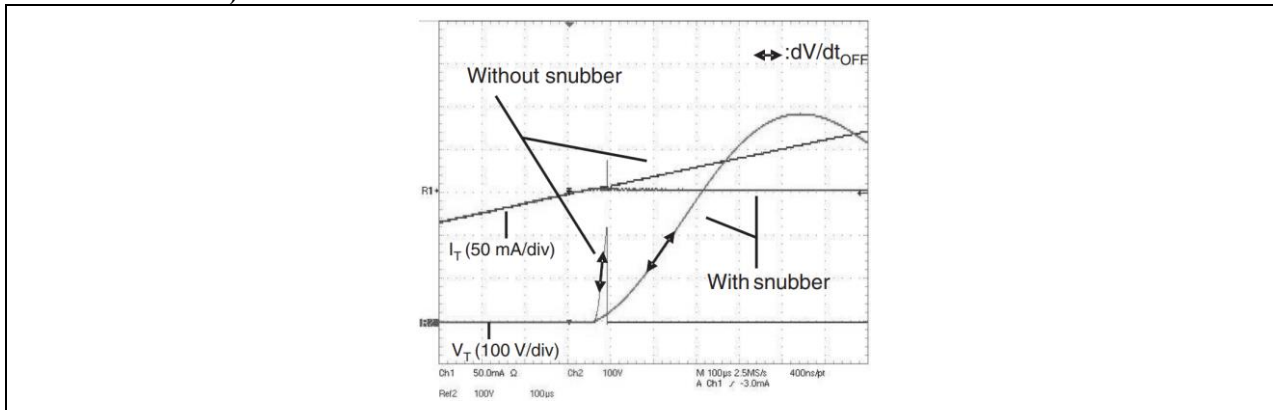


RC-демпферная цепь должна использоваться, когда существует риск ложного срабатывания симистора, т. е. когда пара $dI/dt_{OFF} - dV/dt_{OFF}$, измеренная в приложении, превышает значения, указанные в таблице данных симистора, $(dI/dt)_c$ при заданной $(dV/dt)_c$.

На рис. 4 показано поведение при выключении стандартного симистора Z0103, который управляет дренажным насосом мощностью 26 Вт. Без демпферной цепи и для максимальной температуры перехода ($110^\circ C$) при выключении возникает ложное срабатывание. Действительно, измеренные значения $(dI/dt)_{OFF}$ и $(dV/dt)_{OFF}$, равные соответственно 0.13 А/мс и 10 В/мкс, превышают гарантированные в точке $(dI/dt)_c - (dV/dt)_c$ (только 7 В/мкс при 0.13 А/мс, см. рис. 3).

Благодаря RC-демпфирующей цепи (10 нФ и 2,7 кОм) крутизна повторно приложенного напряжения может быть ограничена до 1.5 В / мкс, и, таким образом, можно избежать ложного срабатывания при выключении (см. рис. 3 и рис. 4).

Рис. 4. Отключение симистора Z0103 при индуктивной нагрузке без демпферной цепи и с ней ($C = 10$ нФ и $R = 2.7$ кОм)



Конструкция демпфирующей схемы, подробно описанная в Разделе 2: **Как разработать демпферную цепь для улучшения выключения**, представляет собой компромисс между максимальным пиковым напряжением в закрытом состоянии в импульсных условиях (V_{DSM}/V_{RSM}), критическим нарастанием повторно приложенного напряжения (dV/dt) и напряжением включения (dI/dt). Когда коммутируется нагрузка с низкой индуктивностью или учитывается низкий коэффициент демпфирования или низкая крутизна повторно приложенного напряжения, конструкция демпфирующей цепи может привести к выбору низкого значения демпфирующего сопротивления. Чтобы уменьшить разряд демпферной емкости при включении, значение сопротивления ограничивают минимальным значением (см. Раздел 1.4).

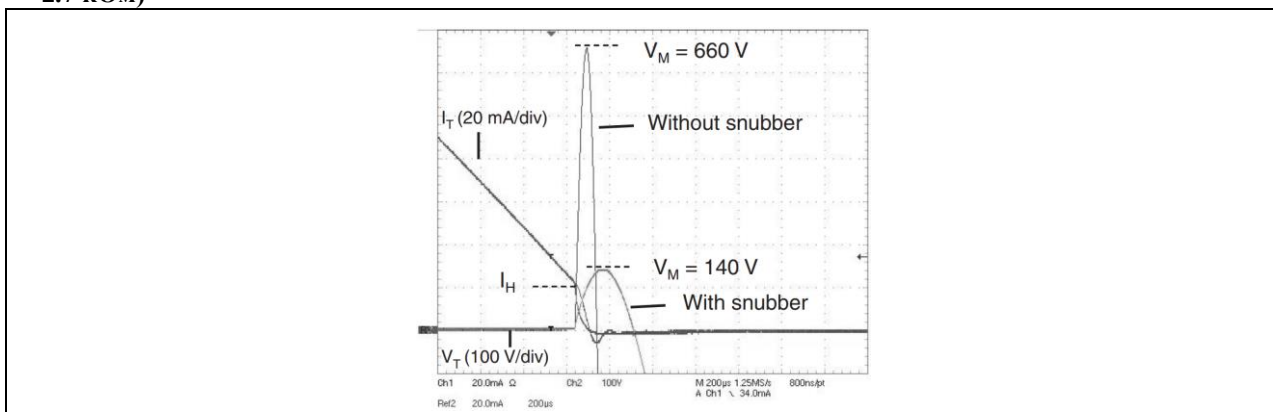
1.2 Ограничение перенапряжения при выключении

Когда симистор коммутирует индуктивную нагрузку с малым действующим током, может возникнуть перенапряжение, когда ток достигнет тока удержания (I_H) (см. Рис. 5).

Если максимальное значение перенапряжения (V_M) превышает максимальное пиковое напряжение в закрытом состоянии в импульсных условиях (V_{DSM}/V_{RSM}), симистор может работать без тока затвора или даже может быть поврежден. Защиты от перенапряжения при выключении:

- **Стратегия фиксации** - используйте варистор или ACSTM / ACST (см. AN1172 о защищенном AC Switch TM);
- **Стратегия демпфирования** - демпфирующая цепь. RC-демпферная цепь ограничивает крутизну нарастания напряжения и может поддерживать перенапряжение на уровне ниже максимально допустимого.

Рис. 5. Перенапряжение при выключении симистора с демпферной цепочкой и без нее ($C = 10$ нФ и $R = 2.7$ кОм)



1.3 Устойчивость к быстрым переходным процессам напряжения

Электрический шум может появляться в сети и вызывать быстрые колебания напряжения симистора, как описано в стандарте IEC 61000-4-4.

Быстрые изменения напряжения могут создавать ток затвора (I_G) из-за емкости перехода между A2 и затвором и могут запускать симистор. Максимальная скорость нарастания внешнего напряжения, которую симистор может выдержать без включения, называется статическим dV/dt . Ложное срабатывание из-за статического dV/dt не опасно для компонента. Целью демпферной схемы является снижение статического dV/dt на более низком уровне, чем dV/dt , указанное в таблице данных, чтобы избежать ложного срабатывания.

RC-демпферная цепь улучшает устойчивость симистора к быстрым скачкам напряжения. Например, что касается стандарта IEC 61000-4-4, стандартный TRIAC Z0109 имеет типичный уровень помехоустойчивости около 0.7 кВ без какой-либо демпфирующей цепи. При наличии демпферной цепи (1 нФ и 47 Ом) уровень помехоустойчивости Z0109 может достигать 4.0 кВ.

При выборе подходящей RC-демпферной цепи разработчик должен пойти на следующий компромисс:

- Уменьшить значения dV/dt : демпфирующая емкость должна быть высокой, а демпфирующее сопротивление должно быть низким;
- Уменьшить скорость dI/dt при включении (см. Раздел 1.4): демпферная емкость должна быть низкой, а демпферное сопротивление должно быть высоким.

1.4 Напряжение включения из-за разряда демпферной цепи

Конструирование демпферной цепи может привести к низкому значению сопротивления. Однако демпферный резистор снижает скорость нарастания тока при включении (dI/dt_{ON}) во время разряда конденсатора. Значение dI/dt_{ON} , превышающее значение dI/dt , указанное в таблице данных, может привести к повреждению симистора.

Скорость нарастания тока прямо пропорциональна начальному напряжению емкости и обратно пропорциональна последовательным индуктивностям платы и демпфирующего резистора. Скорость нарастания тока зависит также от скорости включения TRIAC, квадрантов запуска и амплитуды тока затвора. Итак, нет простого способа предсказать скорость роста тока.

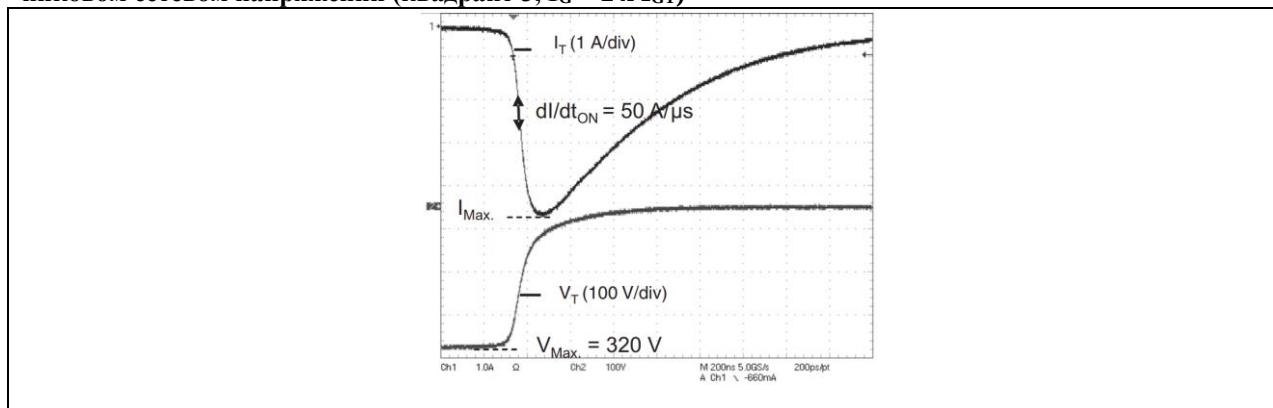
Обычно индуктивность схемы очень мала, в пределах нескольких нГн. Действительно, чтобы оптимизировать эффективность демпфирующей цепи, демпфирующая цепь должна быть расположена очень близко к симисторному преобразователю (длина дорожек менее 2 см).

Из технических характеристик таблицы можно выделить три диапазона максимального значения dI/dt :

- $dI/dt = 20 \text{ A} / \mu\text{s}$: для малых токов симистора (0.8 А и 1 А);
- $dI/dt = 50 \text{ A} / \mu\text{s}$: для остальных симисторов (от 4 А до 40 А);
- $dI/dt = 100 \text{ A} / \mu\text{s}$: для некоторых ACST (от 6 А до 12 А).

Чтобы поддерживать dI/dt_{ON} ниже 50 А/мкс для симисторов и менее 100 А/мкс для ACST, демпфирующее сопротивление обычно должно быть выше 47 Ом (см. рис. 6). Для максимального значения dI/dt 20 А/мкс минимальное значение сопротивления составляет около 620 Ом. Поэтому, в зависимости от используемого компонента, необходимо провести некоторые испытания, чтобы точно определить минимальное значение сопротивления.

Рис. 6. Типичный разряд демпферной цепи ($C = 10 \text{ нФ}$ и $R = 47 \text{ Ом}$) с симистором ВТА / ВТВ16 при пиковом сетевом напряжении (квадрант 3, $I_G = 2 \times I_{GT}$)



2. Как разработать схему демпфера для улучшения выключения

2.1 Переходная характеристика последовательной RLC цепочки

Демпферный контур $R_S C_S$ составляет резонансный контур с индуктивной нагрузкой (см. L и R на рис. 7). При выключении демпферная цепь ограничивает крутизну повторно приложенного напряжения (dV/dt_{OFF}), но генерирует перенапряжение (V_P). Конструкция демпфирующей схемы приводит к компромиссу с учетом как наклона повторно приложенного напряжения ((dV/dt) с), так и максимального пикового напряжения в закрытом состоянии в импульсных условиях (V_{DSM}/V_{RSM}).

Электрическая схема, анализируемая в этом параграфе, представлена на рис. 7.

Рис. 7. Схема применения и ее эквивалентная схема при выключении.

Для линейного дифференциального уравнения второго порядка со входом ступенчатой функции изменение напряжения на демпфирующей емкости ($V_{CS}(t)$) и симисторе ($V_T(t)$) определяется как:

Уравнение 1

$$\frac{1}{\omega_o^2} \cdot \frac{d^2 V_{CS}(t)}{dt^2} + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_o} \cdot \frac{dV_{CS}(t)}{dt} + V_{CS}(t) = E$$

Уравнение 2

$$V_T(t) = R_S \cdot C_S \cdot \frac{dV_{CS}(t)}{dt} + V_{CS}(t)$$

С коэффициентом демпфирования:

Уравнение 3

$$\xi = \frac{(R_S + R)_{(\Omega)}}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{S(F)}}{L_{(H)}}}$$

Незатухающий естественный резонанс:

Уравнение 4

$$\omega_{o(rad/s)} = \frac{1}{\sqrt{L_{(H)} \cdot C_{S(F)}}}$$

Конечное значение напряжения:

Уравнение 5

$$E = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} \cdot \sin(\varphi)$$

Где:

$$\sin(\varphi) = \frac{L \cdot \omega}{\sqrt{R^2 + (L \cdot \omega)^2}}$$

V_{RMS} - действующее напряжение сети.

Коэффициент делителя цепи демпфера:

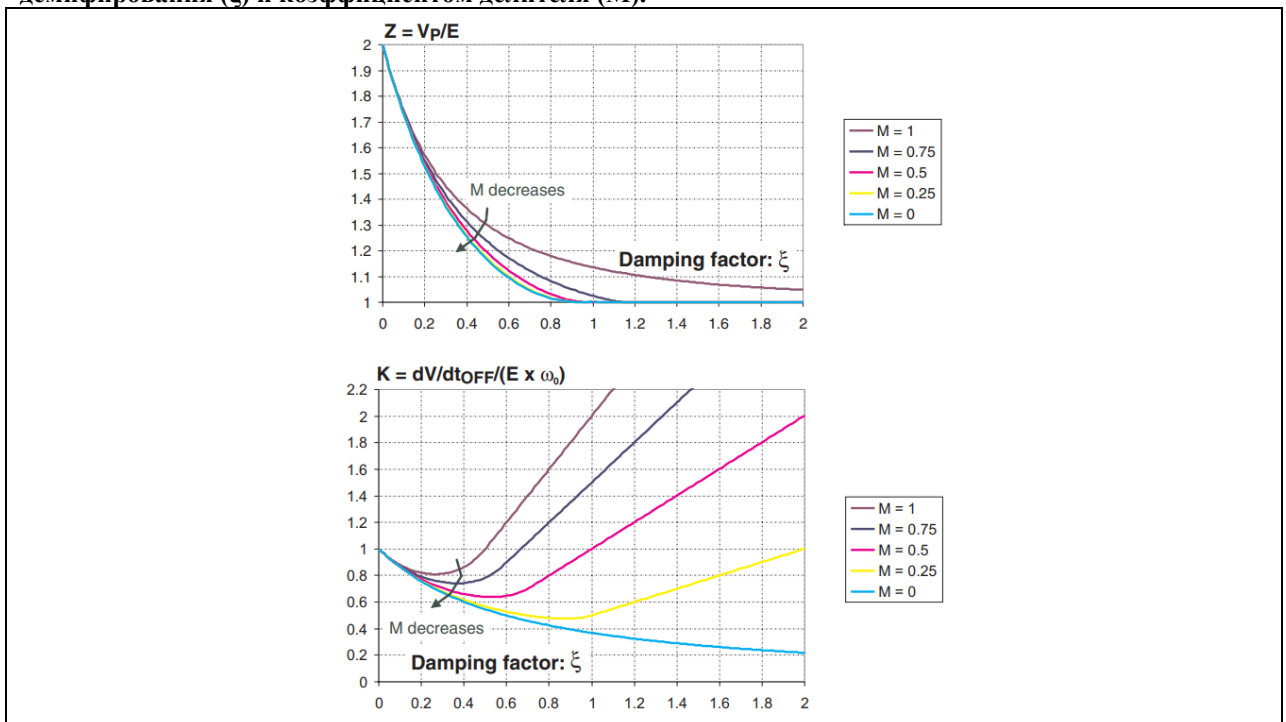
Уравнение 6

$$M = \frac{R_s}{R_s + R}$$

Решив линейное дифференциальное уравнение второго порядка в соответствии с коэффициентом демпфирования и начальными условиями (см. Приложение А: **Объяснение переходной характеристики последовательной RLC цепочки**), можно определить две диаграммы. Эти диаграммы показывают крутизну роста напряжения (dV/dt_{OFF}) и пиковое напряжение (V_p) в зависимости от коэффициента демпфирования (ξ) и сопротивления нагрузки (M) (см. Рис. 8).

Крутизна нарастания напряжения (dV/dt_{OFF}) определяется как максимальная мгновенная крутизна нарастания напряжения.

Рис. 8. Компромисс между нормализованным пиковым напряжением ($Z = V_p / E$), нормализованной крутизной нарастания напряжения ($K = dV/dt_{OFF} / (E \times \omega_0)$) в соответствии с коэффициентом демпфирования (ξ) и коэффициентом делителя (M).



Как показано на этих двух диаграммах, сопротивление нагрузки (R) помогает снизить dV/dt_{OFF} и V_p . Воздействие нагрузки будет значительным, если коэффициент демпфирования выше 0.2.

2.2 Конструкция демпферной цепи RC

2.2.1 Требуется ли демпферная цепь?

Без демпфирующей схемы крутизна повторно приложенного напряжения ограничивается емкостью перехода симистора между анодом и катодом. Колебательный контур состоит из нагрузки L и R и внутренней емкости C_T симистора.

Например, типичные внутренние емкости симистора на 1 А, 12 А и 24 А составляют соответственно 12 пФ, 90 пФ и 180 пФ (без поляризации перехода при постоянном напряжении, в худшем случае). Без демпфирующей цепи и для большей части индуктивных нагрузок коэффициент демпфирования (ξ) обычно ниже 1.

Для колебательного контура с недостаточным демпфированием ($0 \leq \xi < 1$) изменение напряжения на симисторе ($V_T(t)$) составляет:

Уравнение 7

$$V_T(t) = E - E \cdot \left(\cos(\omega_p \cdot t) + \frac{\xi \cdot \omega_o}{\omega_p} \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_o \cdot t}$$

С затухающим естественным резонансом:

Уравнение 8

$$\omega_p = \omega_o \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

Например, в случае дренажного насоса мощностью 26 Вт ($L = 2.4$ Гн и $R = 190$ Ом при 50 Гц), управляемого симистором Z0103 ($C_T = 12$ пФ), коэффициент демпфирования близок к нулю ($\xi = 2.1 \times 10^{-4}$).

Для низкого коэффициента демпфирования нормализованная крутизна нарастания напряжения K равна 1 (см. Рис. 8, нижний график). Тогда максимальный наклон повторно приложенного к симистору напряжения составляет:

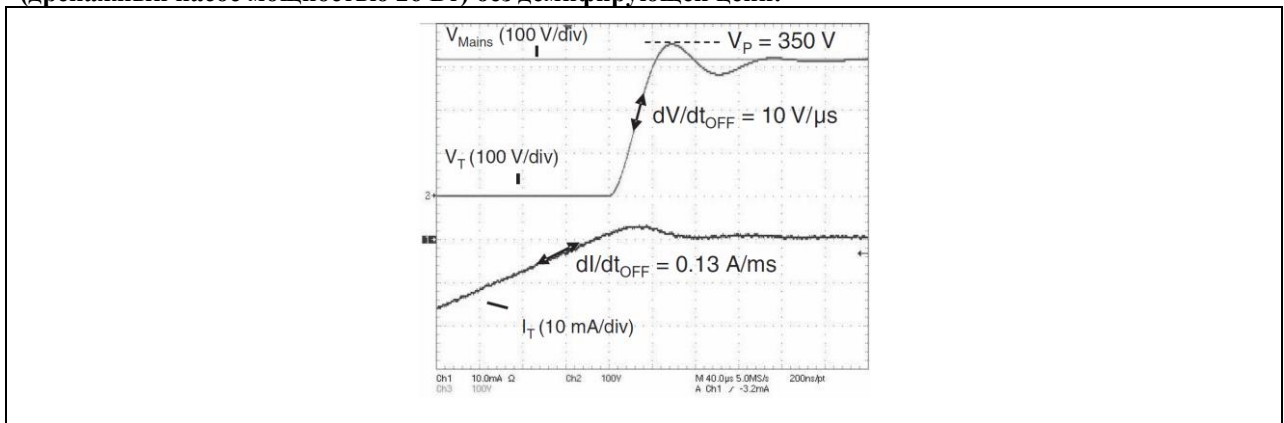
Уравнение 9

$$\left(\frac{dV}{dt} \right)_{OFF(V / \mu s)} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS(V)} \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{L_{(H)} \cdot C_{T(F)}}} \cdot 10^{-6}$$

Согласно этой формуле расчетное значение dV/dt_{OFF} без демпферной цепи равно 59 В/мкс. Как показано на рис. 9, измеренное значение dV/dt_{OFF} на самом деле составляет около 10 В/мкс.

Ошибка между результатом уравнения 9 и реальным значением связана с тем, что мы не учли насыщение индуктивности нагрузки (реальное значение выше при низком токе), параллельный паразитный конденсатор нагрузки, ток восстановления и сопротивление нагрузки увеличивается с частотой. Кроме того, измерение выключения выполняется с помощью пробника напряжения, который добавляет конденсатор на 12 пФ через симистор. Таким образом, измеренное значение dV/dt_{OFF} всегда ниже теоретического значения, определяемого уравнением 9.

Рис. 9. Переходной процесс при отключении симистора Z0103 в условиях индуктивной нагрузки (дренажный насос мощностью 26 Вт) без демпфирующей цепи.



RC-демпферную цепь необходимо использовать, когда существует риск ложного срабатывания симистора, то есть когда измеренные значения dI/dt_{OFF} и dV/dt_{OFF} выше, чем указанные значения $(dI/dt)_c$ и $(dV/dt)_c$. В нашем случае применения и для наихудших условий нагрузки (переходный режим) измеренные значения $(dI/dt)_{OFF}$ и $(dV/dt)_{OFF}$ равны соответственно 0.13 А/мс и 10 В/мкс. Эти значения выше указанных значений $(dI/dt)_c$ и $(dV/dt)_c$, см. **Раздел 1.1.2.**

Благодаря RC-демпфирующей цепи, описанной в следующем абзаце, можно ограничить крутизну повторно приложенного напряжения и, таким образом, избежать ложного срабатывания при выключении.

2.2.2 Конструкция демпфирующей цепи резистора и конденсатора

Конструкция демпфирующей схемы зависит от коэффициента демпфирования (ξ).

Когда ξ уменьшается, значения демпфирующего резистора и конденсатора уменьшаются, но пиковое напряжение и разрядный ток демпферной цепи увеличиваются. Максимальное мгновенное значение dV/dt_{OFF} происходит в момент времени после $t = 0$, когда ξ меньше 0.5.

Когда ξ увеличивается, значения демпфирующего резистора и конденсатора увеличиваются, а выброс напряжения уменьшается. Максимальное мгновенное значение dV/dt_{OFF} происходит при $t = 0$, когда ξ больше 0.5.

Рекомендуются низкие коэффициенты демпфирования. Действительно, благодаря возможности высокого напряжения симисторов, демпфирующая цепь может быть оптимизирована для уменьшения емкости конденсатора и, таким же образом, снижения стоимости демпфирующей цепи.

Чтобы проиллюстрировать конструкцию RC-демпферной цепи, рассматривается дренажный насос мощностью 26 Вт ($L = 2.4$ Гн и $R = 190$ Ом при 50 Гц), управляемый симистором Z0103.

Для проектирования демпферной цепи можно использовать два метода. В первом методе создается RC-демпферная цепь с учетом сопротивления нагрузки. Второй метод рассматривает чисто индуктивную нагрузку.

Первый метод проектирования RC-демпферной схемы делится на четыре этапа:

1. Выбор демпфирующего сопротивления

Чтобы ограничить нагрузку при включении симистора и оптимизировать устойчивость симистора к быстрым скачкам напряжения, демпферное сопротивление установлено на минимальное значение.

Для Z01 TRIAC значение dI/dt при включении ограничено до 20 А/мкс. Минимальное значение демпфирующего сопротивления составляет 620 Ом (см. **Раздел 1.4**).

Используя уравнение 6, коэффициент делителя демпферной цепи М равен:

$M = 0.77$ с $R = 190$ Ом и $R_S = 620$ Ом

2. Определение коэффициента демпфирования

Демпфирующий конденсатор зависит от незатухающего собственного резонанса (ω_0) и коэффициента демпфирования (ξ). Рассмотрим следующие модифицированные формы уравнения 4 и 3:

Уравнение 4 изменено

$$C_S = \frac{1}{\omega_o^2 \cdot L} \text{ с } \omega_o = \frac{dV/dt_{OFF}}{E \cdot K}$$

Где К - нормализованная крутизна нарастания напряжения (см. Нижний график на рис. 8).

Уравнение 3 изменено

$$C_S = 4 \cdot \frac{L}{(R + R_S)^2} \cdot \xi^2$$

Из двух предыдущих уравнений отношение между нормализованной крутизной нарастания напряжения (К) и коэффициентом демпфирования (ξ) дается уравнением 10. На рис. 10, полученном из нижнего графика на рис. 8, показано изменение этого отношения с ξ :

Уравнение 10

$$\frac{K}{\xi} = 2 \cdot \frac{L}{R_S + R} \cdot \frac{dV/dt_{OFF}}{E}$$

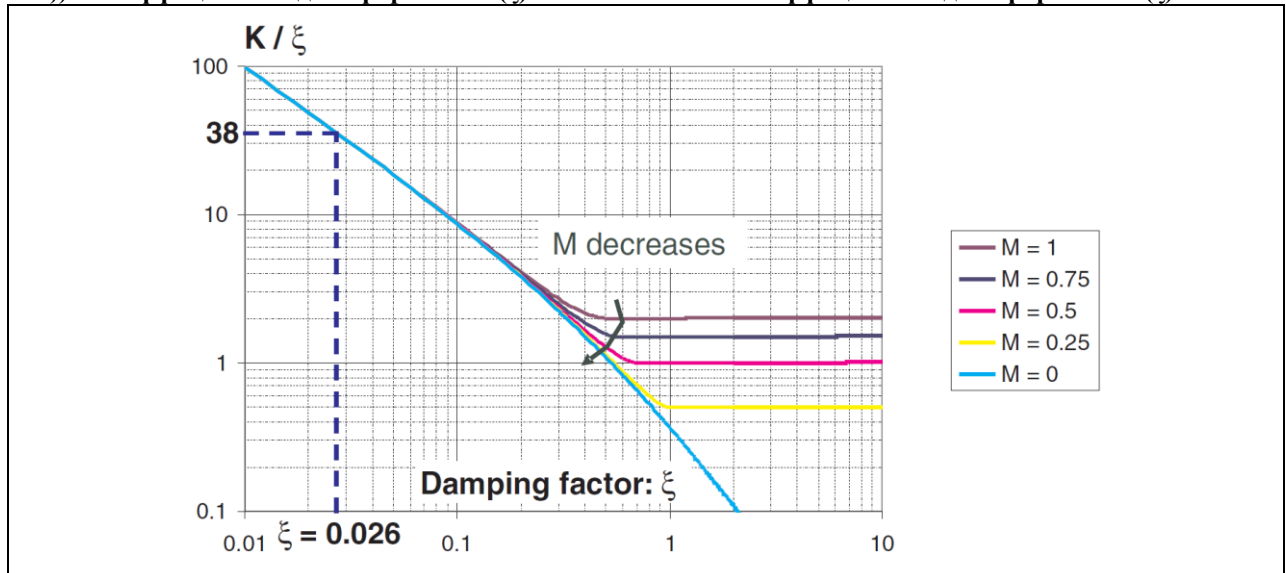
Для управляемого дренажного насоса ($L = 2.4$ Гн и $R = 190$ Ом при 50 Гц) и с использованием уравнения 5 конечное значение напряжения Е равно:

$E = 306$ В для $V_{RMS} = 230$ В и с $\varphi \approx 76^\circ$

Чтобы избежать ложного запуска симистора Z0103, dV/dt_{OFF} фиксируется на 2 В/мкс (ниже максимально допустимого (dV/dt), см. рис. 2).

Таким образом, согласно уравнению 10 отношение между нормализованной крутизной нарастания напряжения и коэффициентом демпфирования равно 38. На рис. 10 показано значение коэффициента демпфирования ($\xi = 0.026$).

Рис. 10. Соотношение между нормализованной крутизной нарастания напряжения ($K = dV/dt_{OFF} / (E \times \omega_0)$) и коэффициентом демпфирования (ξ) в соответствии с коэффициентом демпфирования (ξ).



3. Расчет демпфирующей емкости и перенапряжения.

Емкость демпфера определяется модифицированной формой уравнения 3:

$$C_{S(nF)} = 4 \cdot \frac{L}{(R + R_s)^2} \cdot \xi^2 \cdot 10^9 \approx 9.9 \text{ нФ при } \xi = 0.026$$

Пиковое напряжение показано на верхнем графике рис. 8. Подойдет компонент на 600 В.

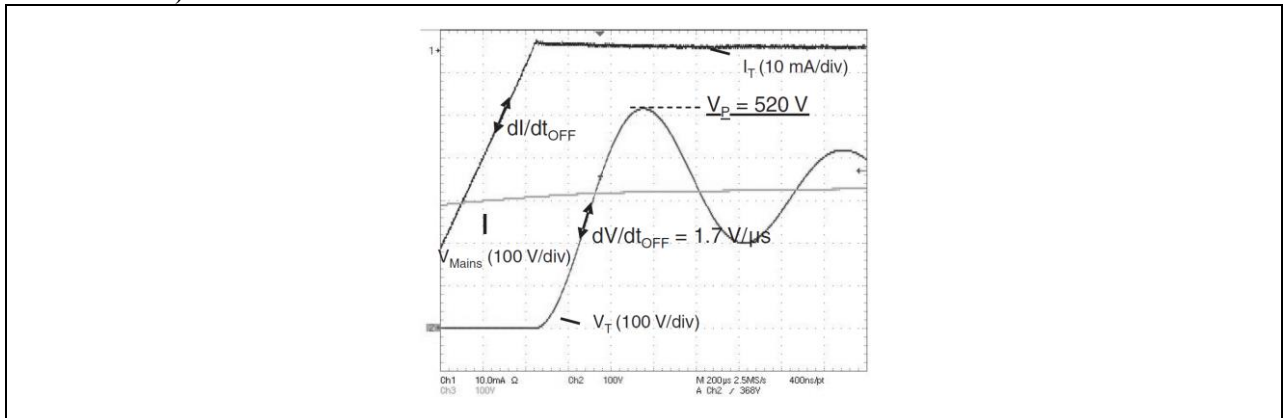
$$V_p = 1.92 \cdot E \approx 607 \text{ В при } \xi = 0.026.$$

4. Проверка схемы RC демпфера

Поведение при выключении и включении должно быть проверено экспериментально, чтобы подтвердить разработанную RC демпферную схему.

Для коммутации выключения измеренная крутизна нарастания напряжения составляет 1.7 В/мкс (рис. 10) и очень близка к теоретической крутизне (2 В / мкс). Измеренное пиковое напряжение (520 В) ниже расчетного значения (607 В) из-за приближений модели RLC (см. Раздел 2.2.1).

Рис. 11. Отключение симистора Z0103 при индуктивной нагрузке с демпфирующей схемой ($C = 10 \text{ нФ}$ и $R = 620 \text{ Ом}$).



Второй метод проектирования RC-демпферной цепи позволяет быстрее выбрать демпферный конденсатор.

Конденсатор выбирается непосредственно из среднеквадратичного значения тока нагрузки (см. рис. 12).

Учитываются чисто индуктивные нагрузки, а крутизна повторно приложенного напряжения фиксируется на уровне 2 В/мкс.

Для заданного среднеквадратичного тока нагрузки и в соответствии с используемым демпфирующим сопротивлением (47 Ом или 620 Ом) определяется соотношение между нормализованной крутизной нарастания напряжения ($K = dV/dt_{OFF} / (E \cdot \omega_0)$) и коэффициентом демпфирования (ξ). (см. уравнение 11).

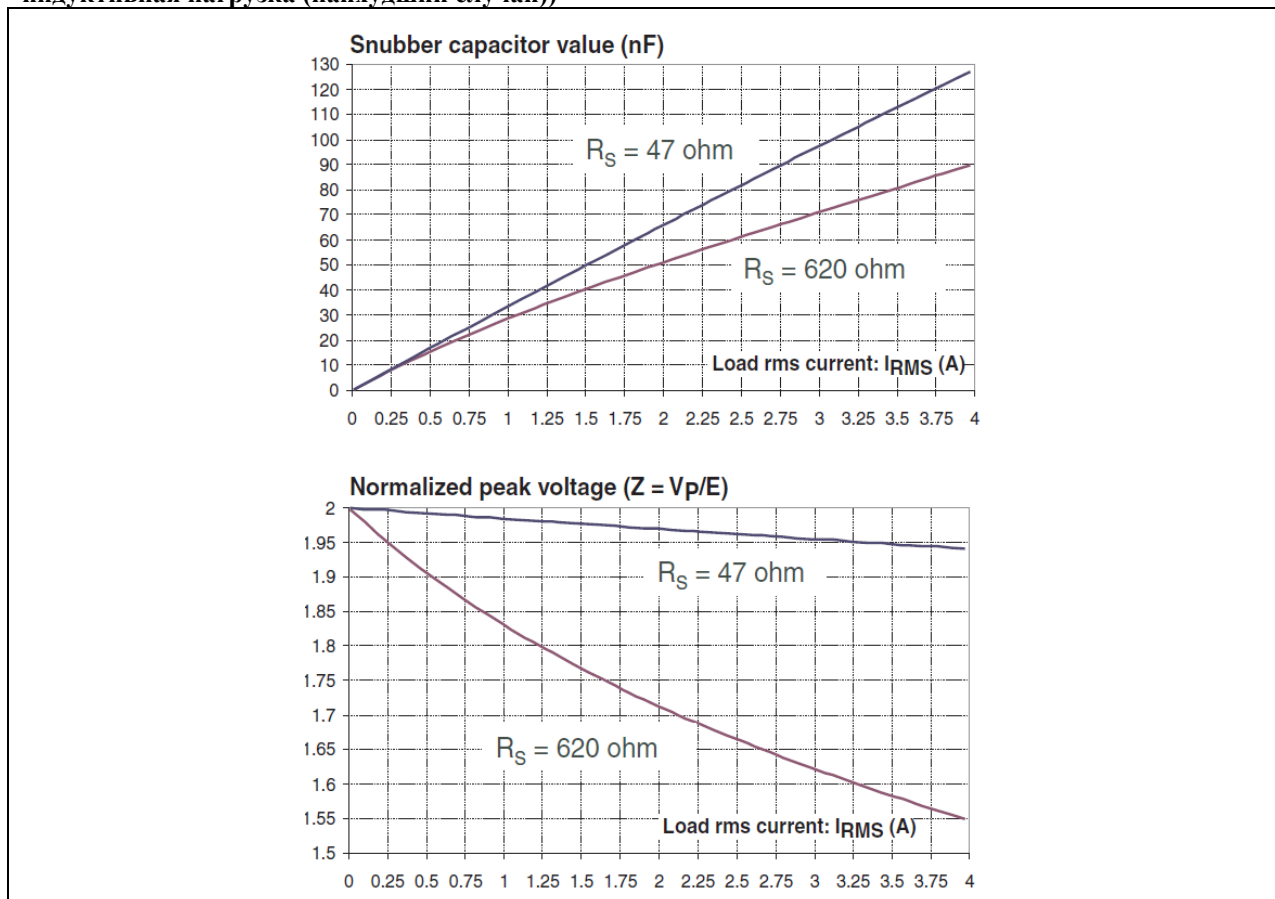
Затем, как и в первом методе проектирования демпфера, коэффициент демпфирования представлен на рис.

10, емкость конденсатора изменена уравнением 3, а пиковое напряжение - на верхнем графике рис. 8.

Уравнение 11

$$\frac{K}{\xi} = 2 \cdot \frac{L}{R_S + R} \cdot \frac{dV/dt_{OFF}}{E} \text{ при } L = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

Рис. 12. Емкость демпферного конденсатора и нормированное пиковое напряжение ($Z = V_p/E$) в соответствии со среднеквадратичным током нагрузки (предположения: $(dV/dt)_{OFF} = 2.0$ В/мкс и чисто индуктивная нагрузка (наихудший случай))



Примечание: Для индуктивной нагрузки со среднеквадратичным значением тока выше 4 А рекомендуются демпферные симисторы.

В случае дренажного насоса мощностью 26 Вт среднеквадратичный ток нагрузки составляет 0.3 А в переходном режиме (наихудший случай). Соответствующее значение демпфирующего конденсатора составляет около 10 нФ, как определено ранее. Расчетное пиковое напряжение составляет 613 В. Расчетное пиковое напряжение на 20% выше измеренного значения из-за приближений модели RLC (см. **Раздел 2.2.1**) и потому, что в приложении нагрузка не является чисто индуктивной, а пиковое значение напряжение ограничено сопротивлением нагрузки.

3 Заключение

RC-демпферная цепь часто используется с симистором и выполняет различные функции:

- Вспомогательная цепь для коммутации выключения;
- Ограничитель быстрого переходного напряжения;
- Ограничитель перенапряжения при коммутации выключения в случае индуктивной нагрузки с низким среднеквадратичным током.

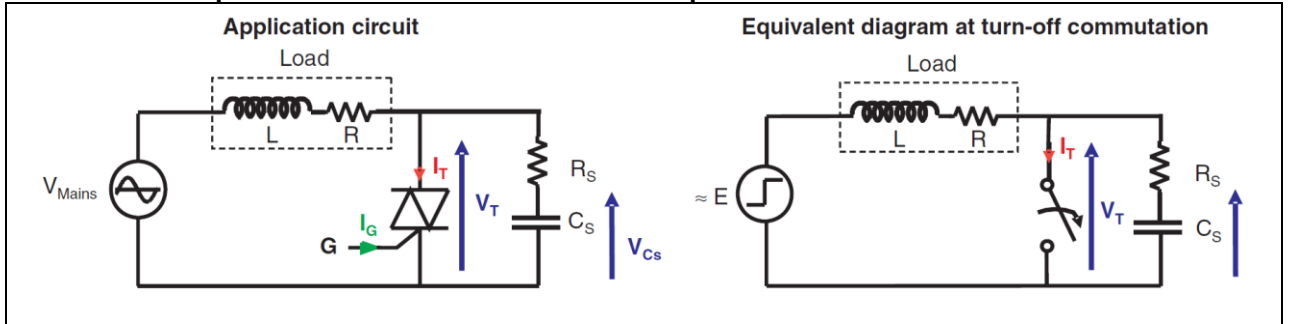
Недостатком RC-демпферной схемы является перегрузка при включении, вызванная разрядом конденсатора. Благодаря возможности высокого напряжения симисторов, конструкция демпфирующей схемы может быть оптимизирована, чтобы уменьшить емкость конденсатора и, таким же образом, снизить стоимость демпфирующей цепи.

Тем не менее, когда контролируются низкие индуктивности нагрузки или учитывается низкий коэффициент демпфирования или низкая крутизна повторно приложенного напряжения, конструкция демпфирующей цепи может привести к выбору низкого значения демпфирующего сопротивления. Чтобы ограничить разряд демпфирующего конденсатора через симистор при включении, сопротивление резистора должно быть выше минимального значения (обычно 47 Ом для большинства симисторов и ACST).

Приложение А. Объяснение переходной характеристики последовательной RLC цепи

Демпферный контур $R_S C_S$ и нагрузка, L и R , составляют резонансный контур. Электрическая схема, анализируемая в этом Приложении, показана на рис. 13.

Рис. 13. Схема приложения и ее эквивалентная схема при выключении.



Примечание: В этом приложении уравнения с 1 по 6 воспроизводятся здесь с той же нумерацией, чтобы облегчить использование этого указания по применению.

Для линейного дифференциального уравнения второго порядка со входом ступенчатой функции изменение напряжения на демпфирующей емкости ($V_{C_S}(t)$) и симисторе ($V_T(t)$) определяется как:

Уравнение 1

$$\frac{1}{\omega_o^2} \cdot \frac{d^2 V_{C_S}(t)}{dt^2} + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_o} \cdot \frac{dV_{C_S}(t)}{dt} + V_{C_S}(t) = E$$

Уравнение 2

$$V_T(t) = R_S \cdot C_S \cdot \frac{dV_{C_S}(t)}{dt} + V_{C_S}(t)$$

С коэффициентом демпфирования:

Уравнение 3

$$\xi = \frac{(R_S + R)_{(\Omega)}}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{S(F)}}{L_{(H)}}}$$

Незатухающий естественный резонанс:

Уравнение 4

$$\omega_{o(rad/s)} = \frac{1}{\sqrt{L_{(H)} \cdot C_{S(F)}}}$$

Конечное значение напряжения:

Уравнение 5

$$E = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} \cdot \sin(\varphi)$$

Где:

$$\sin(\varphi) = \frac{L \cdot \omega}{\sqrt{R^2 + (L \cdot \omega)^2}}$$

V_{RMS} - действующее напряжение сети.

Коэффициент делителя цепи демпфера:

Уравнение 6

$$M = \frac{R_s}{R_s + R}$$

Изменение напряжения ($V_T(t)$) на симисторе зависит от коэффициента демпфирования.

Для каждого коэффициента демпфирования начальные условия решения дифференциального уравнения одинаковы:

При $t = 0$

Уравнение 12

$$\left(\frac{dV_T}{dt} \right)_0 = \frac{E \cdot R_s}{L}$$

При $t = \infty$

Уравнение 13

$$V_T(\infty) = E$$

Примечание:	Ток восстановления из-за заряда накопителя не учитывается в начальных условиях.
--------------------	---

• Недемпфированный колебательный контур: $0 \leq \xi \leq 1$

Уравнение 14

$$V_T(t) = E - E \cdot \left(\cos(\omega_p \cdot t) + (2 \cdot (1 - M) - 1) \cdot \frac{\xi \cdot \omega_0}{\omega_p} \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_0 \cdot t}$$

С затухающим естественным резонансом

Уравнение 15

$$\omega_p = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

• Демпфированный колебательный контур: $\xi = 1$

Уравнение 16

$$V_T(t) = E - E \cdot (1 + (2 \cdot (1 - M) - 1) \cdot \omega_0 \cdot t) \cdot e^{-\omega_0 \cdot t}$$

С затухающим естественным резонансом

Уравнение 17

$$\omega_p = \omega_0$$

- Передемпфированный колебательный контур: $\xi > 1$

Уравнение 18

$$V_T(t) = E - E \cdot \left(\cos(\omega_p \cdot t) + (2 \cdot (1 - M) - 1) \cdot \frac{\xi \cdot \omega_0}{\omega_p} \cdot \sinh(\omega_p \cdot t) \right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_0 \cdot t}$$

С затухающим естественным резонансом

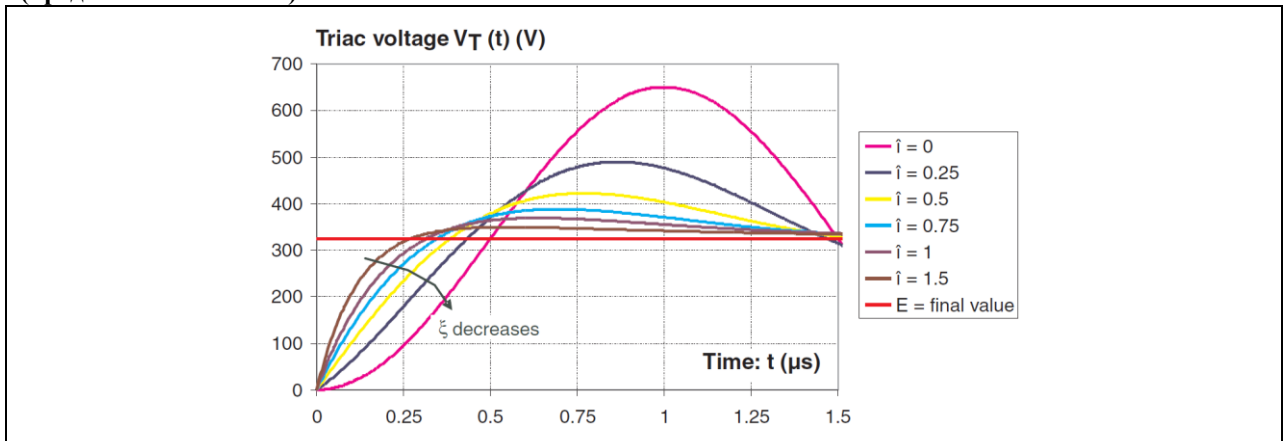
Уравнение 19

$$\omega_p = \omega_0 \cdot \sqrt{\xi^2 - 1}$$

Благодаря этим трем уравнениям и их производным, изменение между пиковым напряжением и крутизной нарастания напряжения может быть определено в соответствии с коэффициентом демпфирования и резистивной нагрузкой.

Коэффициент затухания определяет форму графика напряжения (см. рис. 14).

Рис. 14. Графики напряжения ($V_T(t)$) для различных коэффициентов демпфирования (ξ) (предположение $M = 1$)



Когда ξ меньше 0.5, форма напряжения не является экспоненциальной, и максимальная мгновенная крутизна нарастания напряжения происходит в момент времени после $t = 0$.

Когда ξ равно и больше 1, происходят некоторые выбросы, даже если колебательный контур затухает и перезатухает.