

Богомольный В.М.
Матвеев А.В.
Феоктистов Н.А.
ИГУПИТ (Москва)

Защита тиристорov в системе управления бытовых приборов и машин

В статье сформулирована математическая модель RLC – демпфирующей цепочки, используемой для защиты от перенапряжения тиристорov в момент включения. Решение дифференциального уравнения позволяет получить оптимальные параметры цепи.

Предложенная модель может быть использована для выбора RLC – цепочки при резонансном пуске, что позволяет увеличить пусковой момент примерно в 2 – 3 раза.

В электротехнике и электронном приборостроении применяются (электрически управляемые в течение 2 – 2,5 мкс) вентили и тиристоры. Для понимания безопасной работы тиристорov необходим анализ физических процессов в условиях ударной ионизации и начальной стадии обратимого пробоя при мгновенном выключении и включении [1-7].

Коммутация тиристора из запертого состояния в проводящее вследствие технологических особенностей изготовления многослойной полупроводниковой структуры и неоднородного распределения токов вызывает локальные концентрации зарядов на межфазных границах. Величину предельного прямого напряжения U_{np} принимают из условия начала разрушения тиристора.

При включении тиристора с частотой выше 400 Гц возникают большие величины производных тока по времени (20-50 А/мкс). Поэтому *мгновенные* значения коммутационных потерь при включении мощных тиристорov могут достигать нескольких киловатт [1] с.55. Амплитуда импульса тока имеет порядок *от 2 до 5 А* (со скоростью изменения 5 А/мкс [1]). При этом в *локальной области* материала резко возрастает температура (поэтому в мощных тиристорах необходимо ребристое охлаждение и специальная вентиляция).

Концентрация напряженности электрического поля вблизи микровыступов на поверхности металлического электрода по данным эксперимента может в 10-60 раз превышать интегральную по толщине тиристора величину.

При защите тиристора от коротких замыканий и перегрузок необходимо, прежде всего, учитывать следующие параметры: интеграл квадрата тока, максимальный ток и производную di/dt (i - ток).

Коэффициент запаса электрической прочности по напряжению обычно принимают 2,5-3 [1] с.98.

Возможны следующие причины резкого роста внешних напряжений:

1. резкое прерывание тока в цепях с индуктивностью или при срабатывании предохранителей с очень высоким напряжением на дуге;
2. *мгновенное* выключение тиристора.

На практике обычно используются следующие способы защиты[1]:

3. конструктивная предварительная (на стадии проектирования);
4. самозащита за счет выбора коэффициента запаса по напряжению;
5. применение тиристорov с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), в которых выше порогового напряжения динамическое сопротивление автоматически становится малым;
6. использование RC -элементов [2,3].

Необходимо, чтобы излишняя энергия автоматически распределялась между приборами и защитой таким образом, чтобы в защищаемых приборах не было перегрузок. Также, каждый элемент электрической схемы должен быть согласован по частоте, амплитуде и электрическому импедансу.

Рассмотрим индуктивную нагрузку, питаемую от источника постоянного напряжения через тиристор (рис.1). Можно регулировать среднее значение напряжения, прикладываемого к нагрузке, если периодически выключать тиристор. Однако, даже при наличии устройства принудительного выключения необходимо, кроме того, предусмотреть *новый путь прохождения тока нагрузки*. Если такого пути не имеется, то всякая попытка выключения тиристора будет сопровождаться опасными *перенапряжениями* на нагрузке и

на тиристоре, так как они определяются значением ЭДС самоиндукции $L \frac{di}{dt}$.

Решением этой задачи является применение диода D , называемого «обратным» (иногда «нулевым» или «буферным»), через который протекает ток в интервале закрытого состояния тиристора.

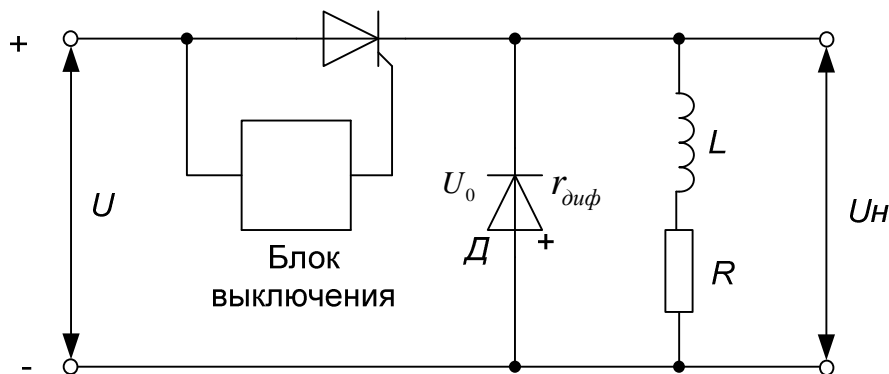


Рис.1. Схема с «обратным» диодом.

Введем следующие обозначения

$$R = \frac{U}{I}, \quad r_{\text{диф}} = \frac{di}{di}, \quad L = \frac{di}{dt},$$

где $T = L / (R + r_{\text{диф}})$ - постоянная времени цепи. Это решение действительно от начального момента времени $t = 0$ до момента t_1 , когда прекращается ток (рис. 2) и исчезает пороговое напряжение U_0 , а сопротивление $r_{\text{диф}}$ становится бесконечно большим. Спад тока в индуктивности в интервале закрытого состояния тиристора определяется индуктивностью L и сопротивлением R нагрузки, а также дифференциальным сопротивлением диода $r_{\text{диф}}$ и его пороговым напряжением U_0 . Уравнение цепи, приведенной на рис. 1, имеет вид [1]

$$L \frac{di}{dt} + (R + r_{\text{диф}})i + U_0 = 0. \quad (1)$$

Решением уравнения (1) является

$$i = Ie^{-t/T} - \frac{U_0}{R+r_{\text{диф}}}(1-e^{-t/T}).$$

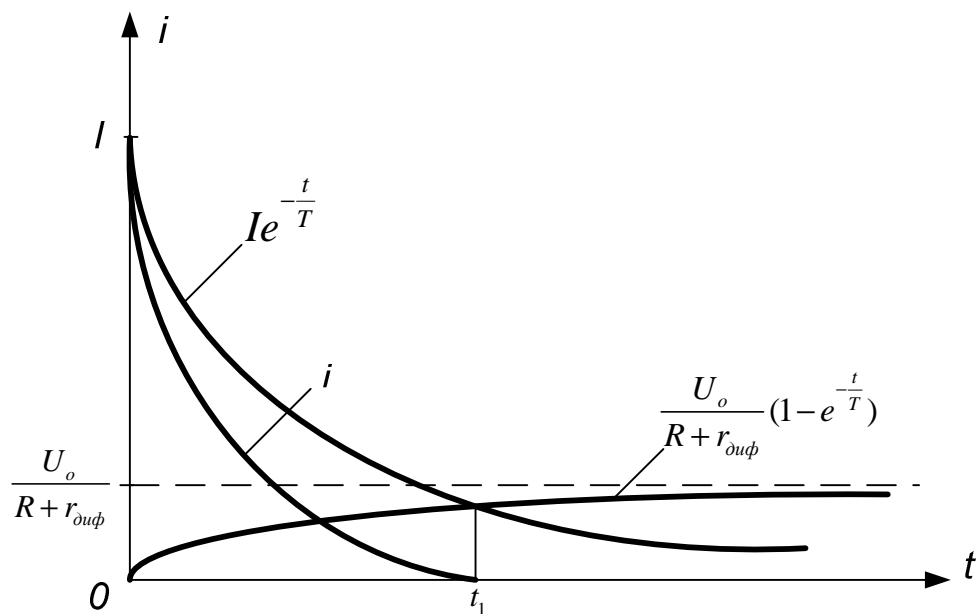


Рис.2. Спад тока нагрузки в цепи с «обратным» диодом.

В случае чисто индуктивной нагрузки и диода с нулевым дифференциальным сопротивлением ток изменяется согласно выражению

$$i = I - \frac{U_0}{L}t.$$

Ток уменьшается из-за наличия падения напряжения U_0 и прекращается по истечении времени

$$t_2 = IL / U_0.$$

Например, при индукции 10 мГн , токе 100 А и пороговом напряжении диода $U_0 = 1 \text{ В}$ получаем:

$$t_2 = \frac{100 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{1} = 1 \text{ с.}$$

Использование конденсаторов в комбинации с резисторами позволяет, с одной стороны *накапливать энергию* в конденсаторах часть энергии

перенапряжений и, с другой стороны, *снижать скорость нарастания* этих перенапряжений (демпфирующая цепочка см. рис. 3).

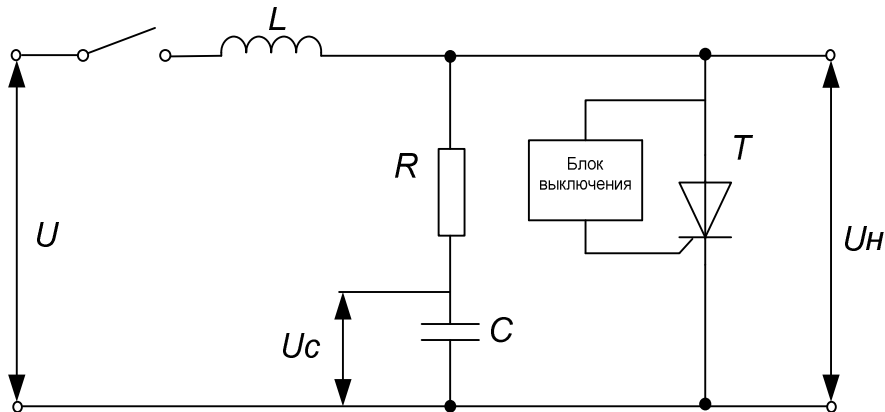


Рис. 3 Эквивалентная схема цепи для расчета защиты тиристора демпфирующей RLC - цепочкой.

Рассмотрим случай, когда происходит включение RLC -контура («демпфирующая цепочка»).

Уравнение RLC -контура, показанное на рис. 3 имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = U. \quad (2)$$

Если это уравнение продифференцировать по t , разделив все члены на L и обозначить $\xi = \frac{R}{2L\omega_p}$ и $1/\sqrt{LC} = \omega_p$ (ω_p - собственная резонансная частота),

где $\xi = \frac{R}{2\sqrt{L/C}}$, то получим

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\xi\omega_p \frac{di}{dt} + \omega_p^2 i = 0. \quad (3)$$

Решение этого уравнения известно

$$i = A_1 e^{\xi\omega_p t} \sin(\omega_p \sqrt{1-\xi} t) + A_2 e^{\xi\omega_p t} \cos(\omega_p \sqrt{1-\xi} t). \quad (4)$$

Для определения постоянных A_1 и A_2 нужно значение тока и его производной в момент $t=0$, т.е. $i_0 = 0$ и $\left(\frac{di}{dt}\right) = \frac{U'}{L}$, подставить соответственно в (4) и в выражение для производной, положив в них $t=0$. Первое из этих выражений дает $A_2 = 0$, а из второго $A_1 = U' / \omega_p \sqrt{1-\xi} L$. Получаем

$$i = \frac{U'}{2jqL} [e^{(-k+jq)t} - e^{-(k-jq)t}],$$

$$\text{где } q = \omega_p \sqrt{1-\xi}, \quad k = \xi \omega_p \text{ и } \sin qt = \frac{e^{jkt} - e^{-jkt}}{2j}.$$

U' - напряжение в момент, когда существовало напряжение на конденсаторе.

С точки зрения защиты важно знать максимальное значение напряжения на зажимах тиристора, и максимальную скорость изменения этого напряжения.

Для напряжения на зажимах тиристора мы можем записать

$$u_T = U - L \frac{di}{dt},$$

и для момента отключения u_T от приложенного к цепи напряжения U

$$\Delta u_T = u_T - U = -L \frac{di}{dt},$$

откуда следует, что

$$\Delta u_T = -\frac{U'}{2jq} [(-k + jq)e^{(-k+jq)t} - (-k - jq)e^{(k-jq)t}].$$

Включение RLC -контура. Пусть в момент времени $t = 0$ к RLC - контуру прикладывается постоянное напряжение U [7]. Это напряжение может быть переменным, но с очень большим периодом по сравнению с периодом переходных процессов. Таким образом, можно предположить, что мы имеем дело со ступенькой напряжения.

Экстремумы перенапряжения $(\Delta u_T)_{\text{экстр}}$ на зажимах защищаемого тиристора или группы тиристорov из аналитического решения дифференциального уравнения (2) выражается уравнением

$$(\Delta u_T)_{\text{экстр}} = U' \frac{-k - jq}{-k + jq} e^{(-k - jq)t}$$

из условия что $\frac{d\Delta u_T}{dt} = 0$ (так как экстремумы Δu_T соответствуют значениям моментов времени t).

В предположении, что $U' = U - U_{C0}$, где U_{C0} - начальное напряжение на конденсаторе, а начальный ток в индуктивности равен нулю. Эти экстремумы получаются в моменты, определяемые уравнениями

$$t = \frac{\ln\left(\frac{-k - jq}{-k + jq}\right)^2}{2jq} = \frac{(r-2)\pi + 2\varphi}{\omega_p \sin \varphi},$$

получаем это при условии, где r - целое число, где t - момент времени соответствия экстремумов Δu_T .

$$\xi = \cos \varphi, \quad \sqrt{1 - \xi^2} = \sin \varphi, \quad k = \xi \omega_p = \omega_p \cos \varphi,$$

$$q = \omega_p \sqrt{1 - \xi^2} = \omega_p \sin \varphi, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{q}{k}, \quad -k + jq = \omega_p e^{j(\pi - \varphi)},$$

$$-k - jq = \omega_p e^{-j(\pi - \varphi)}, \quad \frac{-k - jq}{-k + jq} = e^{-2j(\pi - \varphi)},$$

$$(-k + jq) + (-k - jq) = -2k = -2\omega_p \cos \varphi,$$

$$(-k + jq) - (-k - jq) = 2jq = 2j\omega_p \sin \varphi,$$

введем обозначения для натурального логарифма

$$\ln\left(\frac{-k - jq}{-k + jq}\right)^2 = 2j[(r-2)\pi + 2\varphi],$$
$$\ln\left(\frac{-k - jq}{-k + jq}\right)^3 = 2j[(r-3)\pi + 3\varphi].$$

Данные замены правомочны только тогда, когда значение $\xi \leq 1$. Это позволяет записать $(\Delta u_T)_{экстр}$ в виде

$$(\Delta u_T)_{экстр} = U' e^{\frac{(r-2)\pi + 2\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}} e^{-jr\pi},$$

где $r = 2$.

Момент времени t должен быть положительным. Из этого следует, что поскольку $\varphi \leq \pi/2$, то r должно быть больше или равно 2.

При $r = 2$ значение $(\Delta u_T)_{экстр}$ по абсолютному значению самое высокое (максимальное) и положительное $U' = U - U_{C0}$. Наибольшие перенапряжения возникают, когда U и U_{C0} имеют противоположные знаки.

Получаем при $r = 2$ эквивалентное значение максимального перенапряжения

$$(\Delta u_T)_M = (U') e^{\frac{2\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}}$$

Зависимость $(\Delta u_T)_M$ от $\xi = \cos \varphi$ показана на рис.4.

Физический смысл имеет только положительные значения du/dt , особенно в первом периоде колебательного процесса, поскольку в последующем происходит уменьшение этих значений вследствие потерь и затухания колебаний.

Примем условия, что $U = 500B$, $U_{C0} = -100B$.

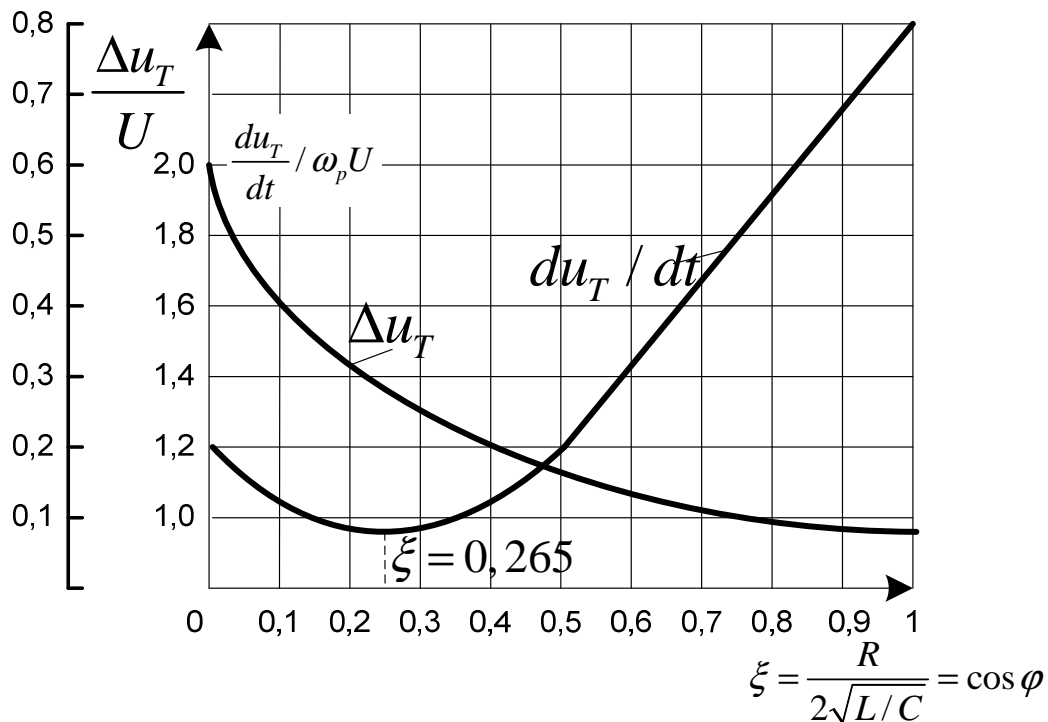


Рис.4. Зависимости (в относительных единицах) перенапряжений и скорости изменения напряжения на зажимах защищаемого тиристора от коэффициента затухания RLC-контура.

Экстремумы скорости изменения напряжения на зажимах тиристора

выражаются при условиях $\frac{d^2 \Delta u_T}{dt^2} = 0$,

$$\left(\frac{d \Delta u_T}{dt} \right)_{\text{экстр}} = U \cdot \frac{(-k - jq)^2}{(-k + jq)} e^{(-k - jq)t},$$

$$\left(\frac{d \Delta u_T}{dt} \right)_{\text{экстр}} = \omega_p U e^{\frac{(r-3)\pi + 3\varphi}{\text{tg } \varphi}} e^{-jr\pi}.$$

Они наступают в момент t' , определяемые из уравнения

$$t' = \frac{\ln \left(\frac{-k - jq}{-k + jq} \right)^3}{2jq} = \frac{(r-3)\pi + 3\varphi}{\omega_p \sin \varphi}.$$

То есть в моменты времени t' наступают максимальные скорости изменения напряжения на зажимах тиристора.

В зависимости от возможных значений аргумента φ различают два максимальных значения $(\frac{d\Delta u_T}{dt})_M$:

При $\varphi \geq \pi/3$ и $r = 2$ (так как t' должно быть положительно) (см. рис. 4)

$$t'_1 = \frac{3\varphi - \pi}{\omega_p \sin \varphi}, \quad (\frac{d\Delta u_T}{dt})_M = \omega_p U' e^{-\frac{3\varphi - \pi}{\text{tg} \varphi}}, \quad \text{если } \omega_p U' > 0.$$

Максимальное значение будет $(\frac{d\Delta u_T}{dt})_M$ самым низким при $\xi = 0,265$,

что соответствует равенству $\frac{d}{d\varphi} \left[\frac{3\varphi - \pi}{\text{tg} \varphi} \right] = 0$.

1. При $\varphi < \pi/3$, т.е. $\xi > 0,5$, значение r должно быть равно 4 (безразмерная величина), чтобы при положительном t' экстремум $d\Delta u_T/dt$, был также положительным. Однако этот максимум меньше крутизны кривой в начале изменения напряжения Δu_T которая равна:

$$(\frac{d\Delta u_T}{dt})_{t=0} = 2\xi \omega_p U'.$$

Выбор элементов R, L, C определяется компромиссом между желанием максимально ограничить du/dt , задавая $\xi \approx 0,265$, и необходимостью максимально ограничить перенапряжения на тиристоре. Оптимальное решение приводит к значениям ξ , лежащим между 0,5 и 1. (см. рис. 4)

Для выбора независимых параметров L, C и R целесообразно принять величину $\xi = 0,65$ (в интервале $0,3 \leq \xi \leq 1$) на рабочей частоте включения тиристора $f = 400$ Гц.

Так как тиристоры закрываются не мгновенно, то и наблюдаемые действительные перенапряжения в 2-3 раза меньше значения Δu_T , при включенных R и C . Перенапряжение учитывается при выборе тиристорov.[8]

Предлагаемый метод защиты может быть использован и для симисторов [9].

Заключение.

Задаваясь по паспортным данным тиристора пороговым напряжением его включения, принимают в расчет значения R и C . Индуктивность L измеряется магнитотранзистором или другим стандартным способом [4,5] (так как именно эта величина сильно меняется по сравнению с сопротивлением).

Список литературы:

1. Магетто Г. Тиристор в электротехнике: пер. с франц. М.: Энергия, 1977. - 93 с.
2. Челноков В. Е., Евсеев Ю.А. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия. 1973.- 69 с.
3. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы: спр. М.: Энергия, 1975.- 216 с.
4. Тихонов Р.Д. //Измерительная техника. 2005. №2. С.61-63.
5. Сучков Г.М. //Измерительная техника: 2005. №3. С.35-38.
6. Богомольный В.М. Преобразование информации. – М.: МГУС, 2003. - 193 с.
7. Богрый В.С., Русских А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. – М.: Энергия, 1972. - 242 с.
8. Осипов В.С., Ратцев В.Р., Каунов А.А. Перенапряжение в трехфазном тиристорном преобразователе с современным управлением группами вентилей// Труды Международной научно-техн. конф.: «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», ч. 3, 2009. С. 160 – 164.
9. Евсеев Ю.А., Крылов С.С. Симисторы и их применение в бытовой электротехнике - М.: Энерготехника, 1990. - 56 с.