

*А.Г. СОСКОВ*, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХГАГХ, Харьков  
*Н.О. САБАЛАЕВА*, аспирант, ХГАГХ, Харьков

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИСТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КЛЮЧА ГИБРИДНЫХ КОНТАКТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Проведено розрахунок параметрів захисного RC-кола з варистором, який обмежує комутаційні перенапруги, що виникають у момент відключення електричних кіл гібридними контакторами змінного струму.

Проведен расчет параметров защитной RC-цепи с варистором, ограничивающей коммутационные перенапряжения, возникающие в момент отключения электрических цепей гибридными контакторами переменного тока.

**Введение.** При работе гибридных контакторов в цепях переменного тока к силовым полупроводниковым приборам (СПП) их полупроводниковых ключей (ПК) в момент выключения прикладываются коммутационные перенапряжения, обусловленные энергией, накопленной в индуктивных элементах питающей сети и самой нагрузки на момент размыкания цепи. Обычно для их ограничений используются защитные RC-цепи (снабберы).

В [1, 2] проведен детальный анализ способов ограничения коммутационных перенапряжений и скорости их нарастания с использованием RC-цепей. Однако, из-за применения в них специальных конденсаторов, рассчитанных на работу при переменном напряжении высокого уровня и имеющих относительно большую емкость (до 2 мкФ), существенно повышаются стоимость и габариты ПК гибридного контактора, при этом уровень коммутационных перенапряжений остается достаточно высоким.

**Цель работы** – усовершенствование защиты полупроводникового ключа гибридного контактора от коммутационных перенапряжений.

**Описание конструкции.** В этой связи предлагается использовать дополнительно с защитной RC-цепью еще и нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН), в качестве которого может быть использован варистор или встречно включенные стабилитроны. Это позволит существенно снизить емкость конденсатора при обеспечении приемлемого уровня перенапряжений, а также повысить устойчивость схемы к

воздействиям внешних перенапряжений. В настоящее время наиболее энергоемкими являются ОПН на основе оксидно-цинковых варисторов (СН2-2, РНС-60) [1]. Такие приборы имеют высокое быстродействие и нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), обеспечивающую эффективную защиту ПК от перенапряжений на заданном уровне за счет поглощения значительной дозы энергии, накопленной в индуктивности отключаемой сети. В случае ПК, состоящего из двух встречно-параллельно подключенных тиристоров, наиболее целесообразно включать варистор параллельно защитной RC-цепи (рис. 1).

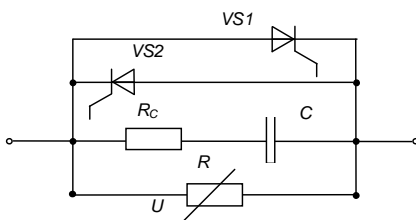


Рис. 1. Вариант защитной RC-цепи с варистором

Достоинствами предлагаемого варисторного ОПН являются простота схемной реализации, малые габариты и масса, улучшенные защитные характеристики (стабильность уровня ограничения перенапряжения и протекания тока через ОПН только на стадии ограничения перенапряжения), низкая стоимость.

**Расчет параметров защитной RC-цепи с использованием варисторного ОПН.** Анализ процесса ограничения перенапряжений на ПК варисторным ОПН (СН2-2) рассмотрим с помощью эквивалентной расчетной схемы (рис. 2), которая является модификацией схемы (рис. 1).

При расчете защитных характеристик варистора СН2-2 обычно аппроксимируют его ВАХ с достаточной для инженерных расчетов точностью (погрешность менее 10 %) выражением [3]:

$$U_B = U_{CT}, \quad (1)$$

где  $U_B$  – напряжение на варисторе.

При этом  $U_{CT}$  варистора выбирается с учетом следующих условий [3]:

$$U_{CT} = (1,5 - 2)U_{ФМ}k \geq E; \quad (2)$$

$$U_{ФМ}k \geq 0,85U_{КЛ}, \quad (3)$$

где  $U_{КЛ}$  – классификационное напряжение варистора, равное напряжению на нем при токе 1 мА.

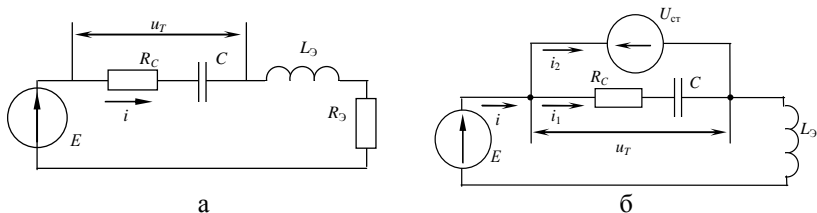


Рис. 2. Эквивалентная расчетная схема защитной RC-цепи с варистором в процессе отключения тиристора (а – до пробоя варистора, б – при пробое варистора)

На схемах:  $R_Э$  и  $L_Э$  – эквивалентные сопротивление и индуктивность размыкаемой цепи,  $U_{ст}$  – напряжение на варисторе при протекании токов, близких к коммутируемому,  $u_T$  – напряжение на тиристоре,  $E$  – восстанавливающееся напряжение,  $R_C$  и  $C$  – сопротивление и емкость защитной RC-цепи.

Анализ показывает, что варистор СН2-2-470В при линейном напряжении сети  $U_{л} = 380$  В ( $k = 1,1$ ) и трехфазной схеме силового гибридного ключа без нулевого провода наиболее полно удовлетворяет поставленным выше условиям.

До пробоя варистора ( $i_2 = 0$ ) переходный процесс в рассматриваемой схеме (рис. 2, а) описывается уравнением (4) и все его решения, приведенные в [2], могут быть использованы для расчетов на этом этапе.

$$L_Э \frac{di}{dt} + R_C i + \frac{1}{C} \int i dt = E \quad (4)$$

где  $E = kU_{Эм} \cdot \sin\phi$ ;  $u_T = R_C i + \frac{1}{C} \int i dt$ ;  $k = \frac{U_{\Phi}}{U_{\Phiном}}$  – величина отклонения фазного напряжения от номинального.

Переходный процесс в рассматриваемой расчетной схеме при пробое варистора (рис. 2, б) описывается следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} L_Э \frac{di}{dt} = E - U_{ст} \\ i_1 R_C + \frac{1}{C} \int i_1 dt = U_{ст} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (5)$$

или после преобразований

$$\begin{cases} L_{\Delta} \frac{di}{dt} = E - U_{\text{CT}} \\ R_C C \frac{di_1}{dt} + i_1 = 0, \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (6)$$

В этой связи начальные условия для решения системы уравнений (6) будут определяться в момент времени  $t_0$ , при котором напряжение на тиристоре  $u_T(t)$  достигает напряжения  $U_{\text{CT}}$ , т.е., решая уравнение  $u_T(t_0) = U_{\text{CT}}$ .

Для примера ниже даны начальные условия для колебательного процесса [2]:

$$i(0) = i_1(0) = I_0 = \left[ I_{RM} \cos \omega_{\text{CB}} t_0 + \frac{E - R_C I_{RM}}{\omega_{\text{CB}} L_{\Delta}} \left( 1 + \frac{\alpha k_1}{\omega_0} \right) \sin \omega_{\text{CB}} t_0 \right] e^{-\alpha t_0}, \quad (7)$$

где  $I_{RM}$  – амплитуда обратного тока через тиристор [2];  $\alpha = \frac{R_C}{2L_{\Delta}}$ ,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL_{\Delta}}}, \quad \omega_{\text{CB}} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad k_1 = \frac{I_{RM} \cdot L_{\Delta} \cdot \omega_0}{E - I_{RM} \cdot R_C}.$$

Время  $t_0$  находится из уравнения

$$U_{\text{CT}} = E - (E - R_C I_{RM}) e^{-\alpha t_0} \left[ \cos \omega_{\text{CB}} t_0 - \frac{\alpha + \omega_0 k_1}{\omega_{\text{CB}}} \sin \omega_{\text{CB}} t_0 \right]; \quad (8)$$

$$U_C(0) = U_{\text{CT}} - I_0 R_C; \quad (9)$$

$$\frac{di}{dt}(0) = \frac{E - U_{\text{CT}}}{L_{\Delta}}. \quad (10)$$

Аналогично можно записать начальные условия и для других видов переходного процесса [2].

После преобразований получим следующее решение системы (6)

$$i_1 = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{E - U_{\text{CT}}}{L_{\Delta}} t + I_0 (1 - e^{-t/\tau}), \quad (12)$$

где  $\tau = R_C C$ .

Максимальное значение тока варистора  $I_{2m}$  определяется из вы-

ражения

$$I_{2m} = \frac{E - U_{\text{ст}}}{L_{\text{э}}} t_m + I_0 (1 - e^{-t_m / \tau}) \quad (13),$$

где  $t_m = \tau \ln \frac{L_{\text{э}} I_0}{(U_{\text{ст}} - E) \tau}$  – время, при котором значение тока через варистор  $i_2$  максимально.

Зная величину  $I_{2m}$ , мы сможем определить с помощью ВАХ варистора СН2-2 [3] напряжение на нем  $U_{\text{вт}}$ , которое и будет соответствовать максимальному перенапряжению на тиристоре ПК ( $U_{T \text{ max}}$ ), т.е.  $\frac{U_{T \text{ max}}}{E} = \frac{U_{\text{вт}}}{E}$ .

Значение  $U_{\text{вт}}$ , мы также можем определить, воспользовавшись следующей аналитической зависимостью, с высокой степенью точности, аппроксимирующей ВАХ варистора [3]

$$I_{2m} = a U_{2m}^{\alpha},$$

где  $\alpha = \frac{2,3}{\ln \left( \frac{U_{10}}{U_{\text{кл}}} \right)}$  – коэффициент нелинейности ( $U_{10}$  – напряжение

при токе 10 мА), значение которого для варисторов типа СН2-2 лежит в диапазоне (32-34);  $a$  – постоянная, значение которой зависит от размеров варистора (для СН2-2  $a = 5 \cdot 10^{-34}$ ).

**Анализ результатов расчета**  $\frac{du_T}{dt}$  на временном интервале  $(0 - t_0)$ , показывает, что  $\frac{du_T}{dt}$  на этом отрезке изменяется незначительно. Поэтому наиболее целесообразно максимальное значение  $\frac{du_T}{dt}$  находить на уровне  $U_T = U_{\text{ст}}$ , где воздействие на тиристор этого фактора максимально [1].

Для колебательного процесса максимальная скорость нарастания напряжения на тиристоре [1, 2]

$$\left(\frac{di_T}{dt}\right)_{max} = (E - R_C I_{RM}) e^{-\alpha t_0} \times \left(2\alpha + \omega_0 k_1\right) \cos \omega_{CB} t_0 + \frac{\omega_{CB}^2 - \alpha(\alpha + \omega_0 k_1)}{\omega_{CB}} \cdot \sin \omega_{CB} t_0, \quad (14)$$

при этом  $R_C$  должно находиться в диапазоне  $0 < R_C < \frac{E}{I_{RM}}$ .

И наконец, энергия, выделяемая в варисторе при перенапряжениях, находится из выражения

$$W = \int_0^{t_1} i_2 U_C dt = \frac{E - U_{CT}}{L_{\Sigma}} U_{CT} \frac{t_1^2}{2} + I_0 U_{CT} (t_1 + \tau e^{-t_1/\tau}), \quad (15)$$

где  $t_1$  – время, при котором ток через варистор  $i_2$  меняет знак, находится из уравнения

$$\frac{E - U_{CT}}{L_{\Sigma}} t_1 + (1 - e^{-t_1/\tau}) I_0 = 0. \quad (16)$$

Результаты расчетов, выполненных на ПЭВМ в среде Mathcad с помощью предложенной выше методики приведены для гибридных контакторов на номинальное напряжение 380 В и разные номинальные токи (трехфазное без нулевого провода исполнение ПК) в табл.1. При этом рассматривался худший случай, когда контактор коммутировал предельный ток ( $I = 10I_{ном}$ ),  $\cos\phi = 0,3$ .

Таблица 1 – Результаты расчетов параметров защитной RC-цепи с применением варисторов

Ном. ток контактора, А	Тип тиристора и его класс	Тип варистора	Параметры RC-цепи		$\frac{U_{Tmax}}{E}$	$\left(\frac{di_T}{dt}\right)_{max}$ В/мкс	W, Дж
			$R_C$ , Ом	C, мкФ			
160	T161-160-7	CH2-2-470В	22,0	0,05	1,19	217,0	0,30
250	T171-250-7	CH2-2-470В	15,0	0,1	1,18	184,0	0,48
400	T143-400-7	CH2-2-470В	10,0	0,15	1,23	304,0	1,46
630	T153-630-7	CH2-2-470В	5,1	0,22	1,25	320,0	1,76

**Выводы.** Проведенные исследования и анализ результатов расчета параметров ОПН показали, что совместное применение защитной RC-цепи и варистора позволяет по сравнению с традиционной схемой защиты уменьшить емкость конденсатора до десяти раз, а значит и результирующий ток утечки в отключенном состоянии аппарата, понизить класс используемых в контакторах СПП (например, в сетях 380 В с десятого до седьмого), а также существенно (до 30 %) понизить уровень коммутационных перенапряжений. Применение же малогабаритного и недорогого варистора, работающего в облегченном режиме, практически не снижает надежность работы устройства и его массогабаритные и стоимостные показатели.

**Список литературы:** 1. *Сосков А.Г., Соскова И.А.* Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. *Сосков А.Г., Сабалаева Н.О., Соскова И.А.* Исследование коммутационных перенапряжений при коммутировании цепей переменного тока гибридными контакторами. Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХДАМГ, 2009. – № 1. – С. 34-40. 3. *Могилевский Г.В.* Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 2 с. 4. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А.* и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

*Поступила в редколлегию 05.02.2009*