

УДК 621.316

А.Г. Сосков, д.т.н.,

Н.О. Сабалаева, аспирант

Харьковская национальная академия городского хозяйства

И.А. Соскова, к.т.н.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Проведено исследование коммутационных перенапряжений, прикладываемых к силовым полупроводниковым приборам полупроводникового ключа гибридных контакторов переменного тока при коммутации электрических цепей. Предложена методика расчёта величины этих перенапряжений, учитывающая динамические характеристики полупроводниковых приборов, а также условия коммутации нагрузки

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТИРОВАНИИ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ГИБРИДНЫМИ КОНТАКТОРАМИ

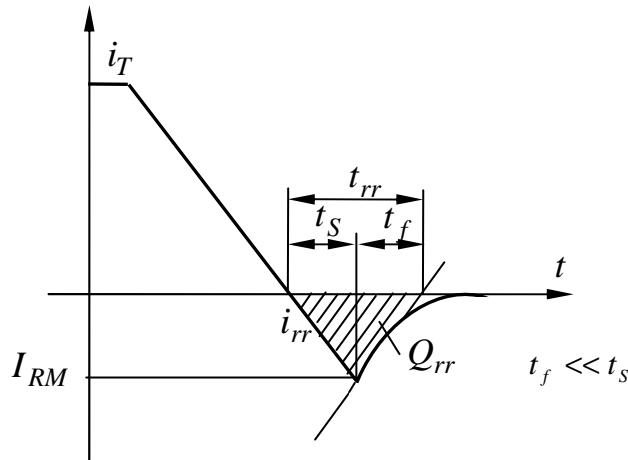
Введение. При отключении электрических цепей гибридными контакторами к силовым полупроводниковым приборам (СПП) их полупроводниковых ключей (ПК) в момент выключения прикладываются так называемые коммутационные перенапряжения. Они обусловлены энергией, накопленной в индуктивных элементах как питающей сети, так и самой нагрузки на момент размыкания цепи. Очевидно, что их величина будет определяться скоростью спада тока в отключаемой цепи и поэтому при использовании в ПК современных быстродействующих СПП она может существенно превосходить напряжение питающей сети. Поскольку стоимость СПП определяется не только током, на который они рассчитаны, но и классом прибора, устанавливающим величину напряжения, которую в состоянии блокировать прибор, необходимо применять специальные меры по снижению этих перенапряжений до уровней близких к сетевым. Обычно для этих целей используются защитные RC-цепи (снабберы) и нелинейные ограничители напряжений (варисторы, стабилитроны и т.д.).

Существующие методики расчёта коммутационных перенапряжений, а также параметров защитных цепей не отличаются требуемой точностью, так как в неполной мере учитывают динамические характеристики СПП, а также условия коммутации нагрузки этими приборами в составе гибридных контакторов [1]. В результате из-за опасения выхода из строя ПК при коммутациях класс используемых СПП в таких аппаратах, как правило, оказывается завышенным, а параметры защитных цепей выбраны с недостаточно обоснованным запасом, что естественно ведёт к повышению стоимости и габаритов аппарата.

В этой связи целью настоящих исследований является создание уточнённых методик расчёта коммутационных перенапряжений в гибридных контакторах при отключении цепей переменного тока, а также разработка усовершенствованных методик расчета элементов цепей защиты от этих перенапряжений.

Методика расчёта коммутационных перенапряжений в гибридных контакторах переменного тока. Коммутационные перенапряжения, возникающие при отключении гибридными контакторами переменного тока активно-индуктивных цепей, обусловлены процессами, протекающими в СПП этих контакторов при их выключении. Известно, что в процессе выключения СПП не сразу восстанавливают запирающие свойства в обратном направлении [1, 2]. Если прибор переводится в непроводящее состояние под действием обратного напряжения, то в течение определённого времени обратный ток возрастает до значения, значительно превышающего статический обратный ток, и в течение этого времени прибор не способен воспринимать обратное напряжение.

Процесс обратного восстановления (см. рис. 1) условно можно разделить на два этапа: до момента достижения обратным током максимального значения и далее до установления статического обратного тока.



В со ответствии с этим время обратного восстановления t_{rr} состоит из времени запаздывания обратного напряжения t_s , в течение которого СПП ещё находится в проводящем состоянии, и времени спада обратного тока t_f , а заряд восстановления Q_{rr} – из заряда запаздывания Q_s и остаточного заряда Q_f .

В соответствии с [3, 4] время обратного восстановления и заряд восстановления при незначительном сопротивлении цепи коммутации и малых скоростях спада тока СПП, что имеет место в гибридных контакторах переменного тока, связаны между собой соотношениями

$$I_{RM} = \sqrt{2Q_{rr} \left(-\frac{di_T}{dt} \right)}; \tag{1}$$

$$t_{rr} = \frac{I_{RM}}{\left(-\frac{di_T}{dt} \right)}; \tag{2}$$

$t_f \ll t_s$, где I_{RM} и $\frac{di_T}{dt}$ – амплитуда обратного тока и скорость его изменения.

В процессе спада обратного тока на временном отрезке t_f и возникают коммутационные перенапряжения, обусловленные запасённой энергией в индуктивных элементах коммутационной цепи при токе I_{RM} . Для их ограничения применяются, как уже указывалось ранее, защитные RC-цепи, включенные параллельно СПП, в которые коммутируется обратный ток из цепи СПП. Кроме того, указанные цепи снижают скорость нарастания перенапряжений [1], что также улучшает условия работы СПП.

Для выбора параметров элементов защитной RC-цепи необходимо, прежде всего, исследовать переходный процесс на СПП гибридных ключей при шунтировании их RC-цепью с учётом рассмотренного процесса выключения СПП, а затем уже на основании принятых ограничений по уровню перенапряжений найти характерные зависимости, позволяющие обоснованно выбирать параметры этих цепей.

Поскольку ПК гибридных контакторов переменного тока выполняются в основном на

тиристорах, то на эквивалентной схеме для расчёта параметров защитной цепи (рис. 2) в качестве СПП рассматриваются мощные тиристоры

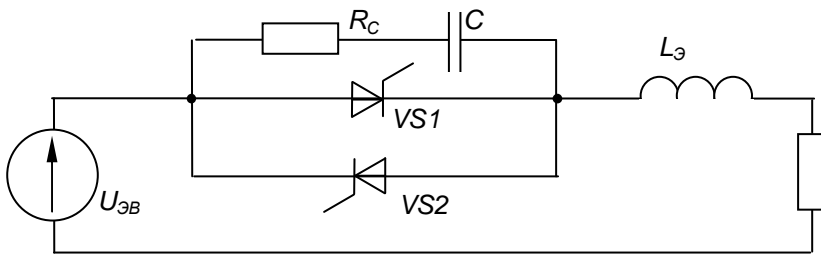


Рис. 2 Эквивалентная схема для расчёта параметров защитной RC-цепи ($U_{эВ} = U_{эм} \sin(\omega t + \varphi)$ – восстанавливающееся напряжение, где $U_{эм}$ – амплитуда эквивалентного напряжения, прикладываемого к ПК в момент прохождения тока в его цепи через нуль и $\varphi = \arctg \frac{\omega L_э}{R_э}$; R_c и C – сопротивление и ёмкость защитной RC-цепи; $L_э$ и $R_э$ – эквивалентные индуктивность и сопротивление размыкаемой цепи.)

Значения $U_{эм}$, $L_э$, $R_э$ для разных схем трёхфазных ПК обоснованы и приведены в [1]. На рис. 3 приведена осциллограмма процесса отключения тиристора, шунтируемого RC-цепью. Из осциллограммы тока следует, что отключение тиристора происходит не в момент прохождения тока через нуль, а после протекания через тиристор обратного тока в течение времени t_{rr} (при этом $t_f \rightarrow 0$).

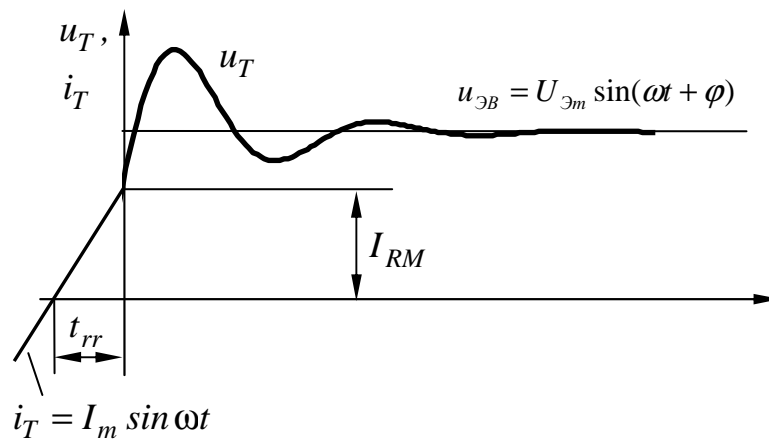


Рис. 3 Осциллограмма процесса отключения тиристора (i_T – мгновенное значение тока через тиристор, $u_{эВ}$ – мгновенное значение восстанавливающегося напряжения) через тиристор, $u_{эВ}$ – мгновенное значение восстанавливающегося напряжения)

Так как скорость спада тока в тиристоре при прохождении его через нуль равна $\frac{di_T}{dt} = I_m \omega$ (I_m – амплитуда отключаемого тока), то в соответствии с (1)

$$I_{RM} = \sqrt{2Q_{rr} I_m \omega} . \tag{3}$$

Значения Q_{rr} для конкретных групп типов тиристоров зависит от скорости спада тока в их цепи и приведены в справочной литературе в виде соответствующих графических зависимостей. Для упрощения расчёта значений I_{RM} была проведена аппроксимация графических зависимостей $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ для групп типов тиристоров, которые могут быть применены при создании гибридных контакторов переменного тока. Результаты аппроксимации в виде аналитических выражений представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты аппроксимации.

Группы типов тиристоров	$Q_{rr}^* = f\left(\frac{di}{dt}\right)$
T142-63, T142-80 – 1-я группа	$Q_{rr}^* = 0,269\left(1 - e^{-0,052\frac{di}{dt}}\right) + 1,079\left(1 - e^{-0,425\frac{di}{dt}}\right)$
T151-100, T161-125, T161-160, T171-200, T171-250, T171-320 – 2-я группа	$Q_{rr}^* = 1,252\left(1 - e^{-0,023\frac{di}{dt}}\right) + 1,164\left(1 - e^{-0,23\frac{di}{dt}}\right)$
T123-200, T123-250, T123-320, T133-320, T133-400, T143-400, T143-500, T143-630, T153-630, T153-800, T253-800, T253-1000, T253-1250 – 3-я группа	$Q_{rr}^* = 1,994\left(1 - e^{-0,038\frac{di}{dt}}\right) + 0,932\left(1 - e^{-0,278\frac{di}{dt}}\right)$
Универсальная кривая для вышеприведенных групп типов тиристоров	$Q_{rr}^* = 1,252\left(1 - e^{-0,027\frac{di}{dt}}\right) + 1,084\left(1 - e^{-0,299\frac{di}{dt}}\right)$

$(Q_{rr}^* = f\left(\frac{di}{dt}\right) = \frac{Q_{rr}}{Q_{rr0}}$ – заряд обратного восстановления в относительных единицах, где

Q_{rr0} – справочное значение заряда обратного восстановления, полученное при $\frac{di}{dt} = 5 \frac{A}{мкс}$).

На рис. 4 приведены кривые изменения заряда обратного восстановления в относительных единицах в зависимости от скорости спада тока для указанных групп типов тиристоров. При этом кривые 1, 2 и 3 получены на основании выражений, приведенных в табл. 1 для соответствующих групп тиристоров, а 4 – усреднённая кривая для этих групп. Наибольшее отклонение среди зависимостей 1, 2 и 3 от усреднённой составляет 1,7 % при $\frac{di}{dt} = 5 \frac{A}{мкс}$, а при $\frac{di}{dt} = 10 \frac{A}{мкс}$ до 10 %. Такие отклонения при определении значения Q_{rr} позволяют рассчитывать амплитуду обратного тока I_{RM} с незначительной погрешностью (менее 5 %), что вполне допустимо при расчёте максимального значения перенапряжения на тиристоре. На рис. 5 показаны зависимости амплитуды обратного тока от отношения отключаемого тока к номинальному для тиристоров типа T161-160, T171-250, T143-400, T153-630 рассчитанные с помощью выражения (3).

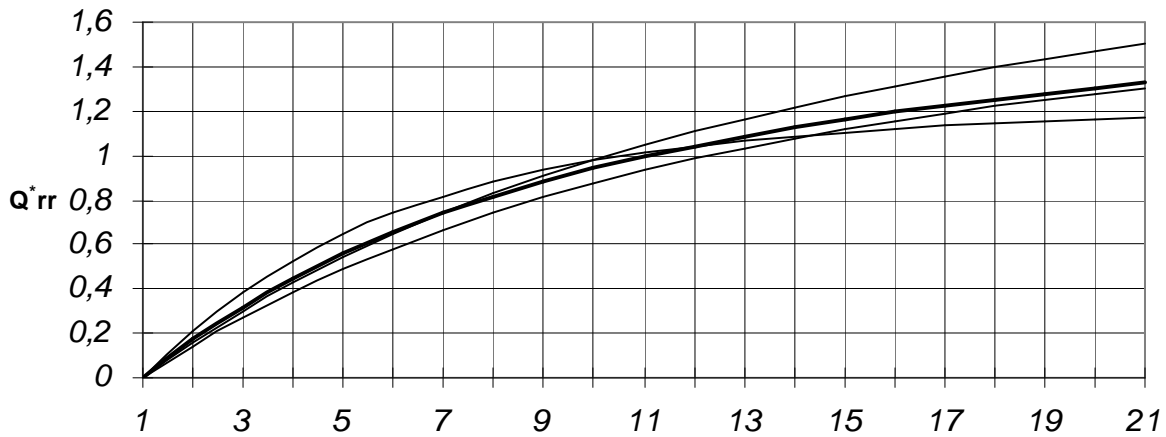


Рис. 4. Графики зависимостей $Q^*_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$, полученные методом аппроксимации для групп типов тиристоров: 1 – 1-я группа, 2 – вторая группа, 3 – 3-я группа, 4 – усреднённая кривая.

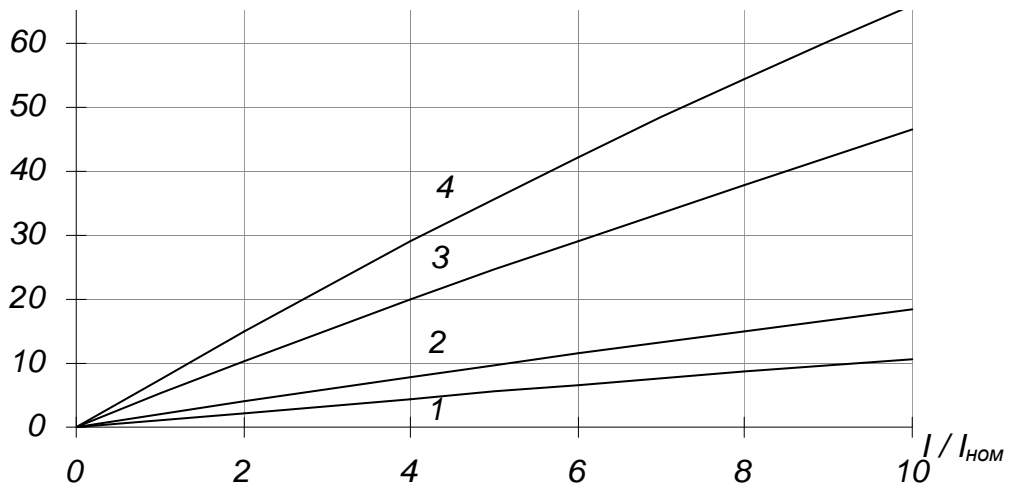


Рис. 5. Зависимость амплитуды обратного тока I_{RM} от кратности тока для разных групп тиристоров (1 – Т161-160, $I_{ном} = 160$ А, 2 – Т171-250, $I_{ном} = 250$ А, 3 – Т143-400 $I_{ном} = 400$ А, 4 – Т153-630, $I_{ном} = 630$ А).

Рассмотрим переходный процесс на тиристорах ПК гибридного контактора при отключении активно-индуктивной цепи при шунтировании его RC-цепью (рис. 6).

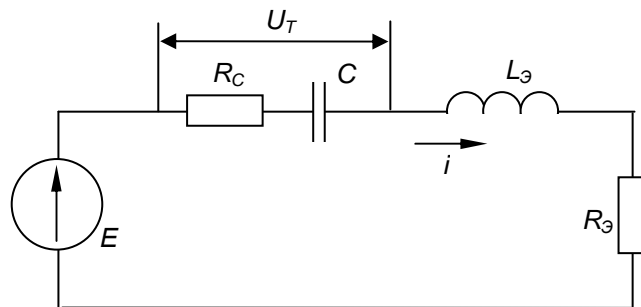


Рис. 6. Схема эквивалентной цепи в процессе отключения тиристора

Этот процесс в соответствии с [5] описывается следующим уравнением:

$$L_{\vartheta} \frac{di}{dt} + R_c i + \frac{1}{C} \int i dt = E \quad (4)$$

где $E = kU_{\vartheta m} \cdot \sin \varphi$ – восстанавливающееся напряжение;

$k = \frac{U_{\varphi}}{U_{\text{ном}}}$ – величина отклонения фазного напряжения от номинального.

При этом пренебрегаем сопротивлением нагрузки, т.к. оно значительно меньше активного сопротивления шунтирующей цепи, а также примем, что в процессе переходного процесса напряжение сети не меняется. Правомерность этих допущений показана в [1].

После соответствующих преобразований (4) с учётом $\alpha = \frac{R_c}{2L_{\vartheta}}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL_{\vartheta}}}$, $\omega_{cb} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ получим

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0, \quad (5)$$

где начальными условиями этого переходного процесса являются значения тока в цепи тиристора и скорости его нарастания в момент времени t_{rr} :

$$i(0) = I_{RM}, \quad \frac{di}{dt}(0) = \frac{E - R_c \cdot I_{RM}}{L_{\vartheta}}.$$

Анализ переходных процессов при отключении электрических цепей. При защите тиристоров от коммутационных перенапряжений RC-цепями переходный процесс в контуре может носить колебательный, аperiodический или критический характер в зависимости от соотношения параметров шунтирующей RC-цепи. Ранее в литературе [1] рассматривался только колебательный процесс, при котором скорость нарастания напряжения наибольшая. Параметры шунтирующей тиристор RC-цепи выбирались таким образом, чтобы не выходить за его пределы, что было связано с малой способностью тиристоров прежнего поколения выдерживать высокую скорость нарастания напряжения на них. В настоящее время массово производятся тиристоры, для которых скорость нарастания напряжения не является определяющим параметром, что позволяет, учитывая любой характер переходного процесса, значительно расширить диапазон выбора параметров шунтирующей RC-цепи при любом характере переходного процесса в цепи. Ниже приведена краткая характеристика этих процессов.

1. Колебательный процесс ($\omega_0 > \alpha$). Решение уравнения (5) с учётом начальных условий будет иметь вид:

$$i(t) = I_{RM} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos \omega_{cb} t + \frac{E - R_c \cdot I_{RM}}{\omega_{cb} L_{\vartheta}} \times \\ \times \left(1 + \frac{\alpha \cdot k_1}{\omega_0} \right) \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_{cb} t, \quad (6)$$

где $k_1 = \frac{I_{RM} \cdot L_{\Sigma} \cdot \omega_0}{E - I_{RM} \cdot R_C}$.

Напряжение на тиристоре

$$u_T(t) = E - (E - R_C \cdot I_{RM}) \cdot e^{-\alpha t} \times \left(\cos \omega_{c\phi} t - \frac{\alpha + \omega_0 k_1}{\omega_{c\phi}} \cdot \sin \omega_{c\phi} t \right). \tag{7}$$

Скорость нарастания напряжения на тиристоре

$$\frac{du_T}{dt} = (E - R_C \cdot I_{RM}) \cdot e^{-\alpha t} \times \left((2\alpha + \omega_0 k_1) \cos \omega_{c\phi} t + \frac{\omega_{c\phi}^2 - \alpha(\alpha + \omega_0 k_1)}{\omega_{c\phi}} \sin \omega_{c\phi} t \right). \tag{8}$$

Экстремальное значение u_T определяется из уравнения $\frac{du}{dt} = 0$, а его корни

$$t_1 = \frac{1}{\omega_{c\phi}} \operatorname{arctg} \frac{\omega_{c\phi} (2\alpha + \omega_0 k_1)}{\alpha(\alpha + k_1 \omega_0) - \omega_{c\phi}^2}. \tag{9}$$

Экстремальное значение $\frac{du_T}{dt}$ определяется из уравнения $\frac{d^2 u}{dt^2} = 0$, а его корни

$$t_2 = \frac{1}{\omega_{c\phi}} \operatorname{arctg} \frac{(\alpha(3\alpha + 2\omega_0 k_1) - \omega_{c\phi}^2) \cdot \omega_{c\phi}}{\alpha(\alpha^2 + \alpha k_1 \omega_0 - 3\omega_{c\phi}^2) - \omega_{c\phi}^2 \omega_0 k_1}. \tag{10}$$

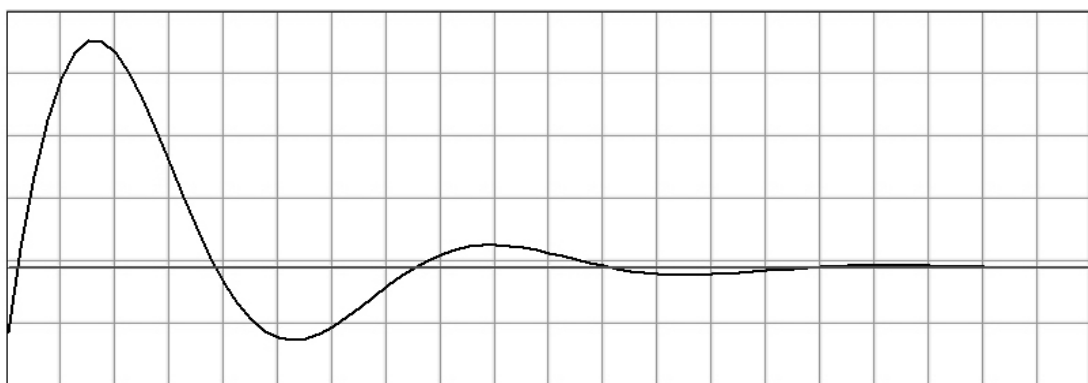


Рис. 7. Оциллограмма периодического процесса отключения тиристора Т153-630 (отключаемый ток – 630 А, $R_C = 50$ Ом, $C = 0,3$ мкФ, $\cos \varphi_H = 0,3$, $k = 1,1$, вариант исполнения ключа – трёхфазный силовой гибридный ключ на базе тиристорov, без нулевого провода)

2. Аперiodический процесс ($\alpha > \omega_0$). Решение уравнения (5) с учётом начальных условий будет иметь вид:

$$i(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (11)$$

Напряжение на тиристоре

$$u_T(t) = E - L_{\sigma} (A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}). \quad (12)$$

Скорость нарастания напряжения на тиристоре

$$\frac{du_T}{dt} = -L_{\sigma} (A_1 p_1^2 e^{p_1 t} + A_2 p_2^2 e^{p_2 t}), \quad (13)$$

где $A_1 = \frac{E - R_C I_{RM} - L_{\sigma} I_{RM} p_1}{L_{\sigma} (p_1 - p_2)},$

$$\begin{aligned} A_2 &= I_{RM} - A_1, \\ p_1 &= -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \\ p_2 &= -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

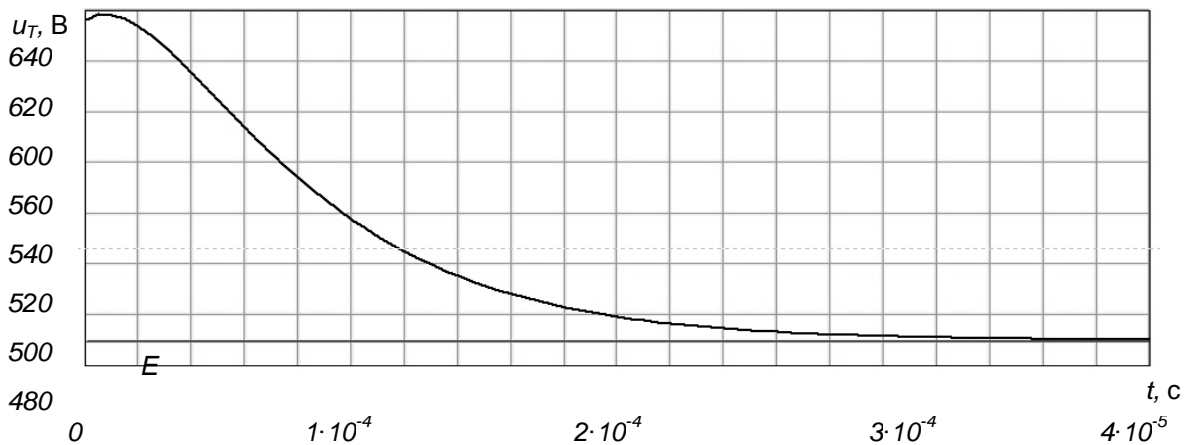


Рис. 8. Осциллограмма аperiodического процесса отключения тиристора Т153-630 (отключаемый ток – 630 А, $R_C = 80$ Ом, $C = 1,1$ мкФ, остальные параметры те же, что и для рис. 7)

3. Критический случай ($\alpha = \omega_0$). Решение уравнения (5) с учётом начальных условий будет иметь вид:

$$i(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t}. \quad (15)$$

Напряжение на тиристоре:

$$u_T(t) = E - L_{\sigma} \cdot e^{-\alpha t} \cdot (A_2 + (A_1 + A_2 t) \cdot \alpha). \quad (16)$$

Скорость нарастания напряжения на тиристоре:

$$\frac{du_T}{dt} = -L_{\varnothing} e^{pt} p \cdot (2A_2 + A_1 p + A_2 t p), \quad (17)$$

$$\text{где } A_1 = I_{RM}, \quad A_2 = \frac{E - R_C I_{RM} + \alpha \cdot I_{RM} L_{\varnothing}}{L_{\varnothing}}, \quad (18)$$

$$p = -\alpha.$$

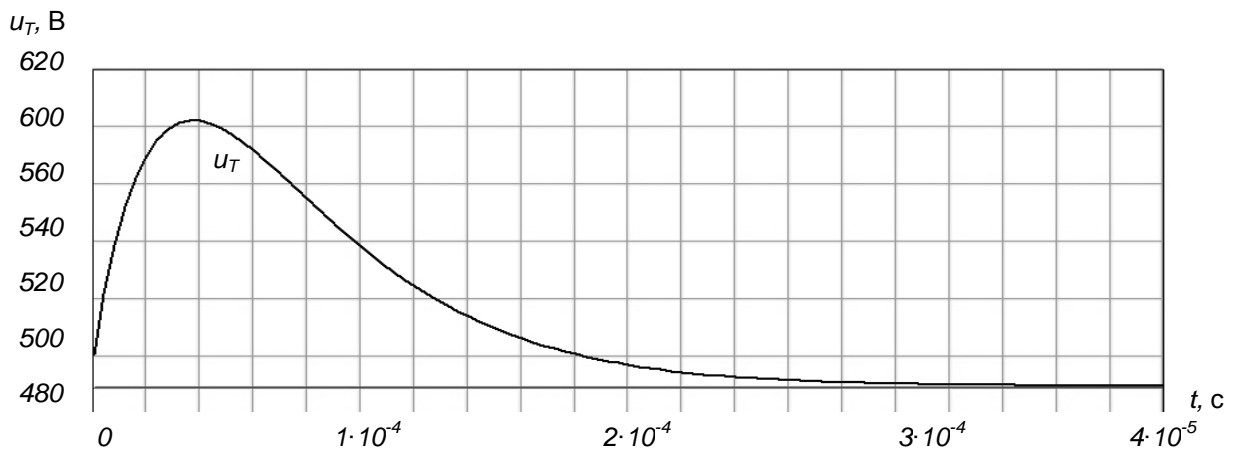


Рис. 9. Осциллограмма критического процесса отключения тиристора T153-630 (отключаемый ток – 630 А, $R_C = 65$ Ом, $C = 1,5$ мкФ, остальные параметры те же, что и для рис. 7)

С помощью ПЭВМ были рассчитаны в среде Mathcad максимальные значения пере-напряжений и скоростей нарастания напряжений на тиристорах при различных параметрах нагрузки и шунтирующей RC-цепи. Ниже приведена основная часть программы, позволяющей определять максимальные значения напряжения на тиристоре U_{Tmax} и максимальное значение скорости нарастания этого напряжения.

$$u_T(t, j, i) := \begin{cases} E - (E - R_{Cj} \cdot I_{RM}) \cdot e^{-\alpha_j t} \cdot \left(\cos(\omega_{CBj,i} \cdot t) - \frac{\alpha_j + \omega_{0i} \cdot k_{1j,i}}{\omega_{CBj,i}} \cdot \sin(\omega_{CBj,i} \cdot t) \right) & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0i}} < 1 \\ E - L_{\varnothing} \cdot \left(A_{1j,i} \cdot p_{1j,i} \cdot e^{p_{1j,i} t} + A_{2j,i} \cdot p_{2j,i} \cdot e^{p_{2j,i} t} \right) & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0i}} > 1 \\ E - L_{\varnothing} \cdot e^{p_{1j,i} t} \cdot \left[A_{2j,i} + p_{1j,i} \cdot (A_{1j,i} + A_{2j,i} \cdot t) \right] & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0i}} = 1 \end{cases}$$

t := 0,0.000005.0.0002

```

uTmax(t,j,i) :=
  a ← 0
  bi,j ← 0
  i ← 1
  j ← 1
  t ← 1
  for j ∈ 1..20
    for i ∈ 1..20
      for t ∈ 0,0.000001.0.0005
        a ← 0 if t = 0
        d ← uT(t,j,i)
        a ← d if d ≥ a
        bj,i ← a if d ≥ a
        rj,i ←  $\frac{b_{j,i}}{(k \cdot 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2)}$ 
  r
  
```

$$Du(t,j,i) := \begin{cases} (E - R_{C_j} \cdot I_{RM}) \cdot e^{-\alpha_j \cdot t} \cdot \left[\left((2 \cdot \alpha_j + \omega_{0_i} \cdot k_{1,j,i}) \right) \cdot \cos(\omega_{CB,j,i} \cdot t) + \frac{(\omega_{CB,j,i})^2 - \alpha_j \cdot (\alpha_j + \omega_{0_i} \cdot k_{1,j,i})}{\omega_{CB,j,i}} \cdot \sin(\omega_{CB,j,i} \cdot t) \right] & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} < 1 \\ -L_{\mathcal{D}} \cdot \left[A_{1,j,i} \cdot (p_{1,j,i})^2 \cdot e^{p_{1,j,i} \cdot t} + A_{2,j,i} \cdot (p_{2,j,i})^2 \cdot e^{p_{2,j,i} \cdot t} \right] & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} > 1 \\ -L_{\mathcal{D}} \cdot e^{p_{1,j,i} \cdot t} \cdot p_{1,j,i} \cdot (2 \cdot A_{2,j,i} + A_{1,j,i} \cdot p_{1,j,i} + A_{2,j,i} \cdot p_{1,j,i} \cdot t) & \text{if } \frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} = 1 \end{cases}$$

```

Dumax(t,j,i) :=
  a ← 0
  bi,j ← 0
  i ← 1
  j ← 1
  t ← 1
  for j ∈ 1..20
    for i ∈ 1..20
      for t ∈ 0,0.000001.0.0005
        a ← 0 if t = 0
        d ← Du(t,j,i)
        a ← d if d ≥ a
        bj,i ← a if d ≥ a
  b
  
```

В этой программе $\frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} < 1$ соответствует колебательному характеру переходного процесса,

$\frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} > 1$ - аperiodическому характеру, $\frac{\alpha_j}{\omega_{0_i}} = 1$ - критическому,

j и i - шаг изменения сопротивления резистора и ёмкости конденсатора RC-цепи соответственно.

Результаты представляются в виде таблицы данных в зависимости от значений ёмкости конденсатора и сопротивления резистора RC-цепи а также трёхмерных графических зависимостей, показанных на рис. 10 и 11.

Анализ результатов расчёта показал, что максимальные значения перенапряжений и скоростей их нарастания при фиксированных параметрах защитной RC-цепи будут иметь место при отключении контактором предельных токов с минимально допустимым $\cos \varphi = 0,3$. Для иллюстрации этого положения на рис. 10 представлены графические зависимости

$\frac{U_{Tmax}}{E} = f(R_C, C)$ и на рис. 11 $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max} = f(R_C, C)$ для тиристора типа Т153-630 при

коммутации им токов 630 и 6300 А с $\cos \varphi_H = 0,3$. При этом было также установлено, что для выбора приемлемых параметров защитной RC-цепи с малыми временными затратами более удобно использовать зависимости этих величин в виде табличных данных (см. табл. 2 и табл. 3).

Таблица 2.

Значения $\frac{U_{Tmax}}{E}$ при различных параметрах RC-цепи для тиристора Т153-630
($\cos \varphi = 0,3$, отключаемый ток 6300 А)

	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
10	3,77	2,79	2,36	2,12	1,96	1,84	1,75	1,68	1,62	1,58
20	3,51	2,76	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
40	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
60	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70
80	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27
100	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84

Таблица 3.

Значения $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$ в В/мкс на тиристоре Т153-630

($\cos \varphi = 0,3$, отключаемый ток 6300 А) при различных параметрах RC-цепи

	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
10	319,0	154,0	99,2	71,7	55,3	44,3	36,4	30,5	26,0	22,3
20	225,0	60,7	5,8	1,5	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
40	9,4	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

В табл. 4 приведены рассчитанные по приведенной выше методике параметры защитной RC-цепи, обеспечивающие приемлемый полуторократный уровень перенапряжений, для

гибридных контакторов на номинальные токи 160, 250, 400 и 630 А с указанием максимальных значений перенапряжений и скоростей их нарастания при использовании в них наиболее распространённого варианта ПК с двумя встречно-параллельно включенными тиристорами (схема без нулевого провода).

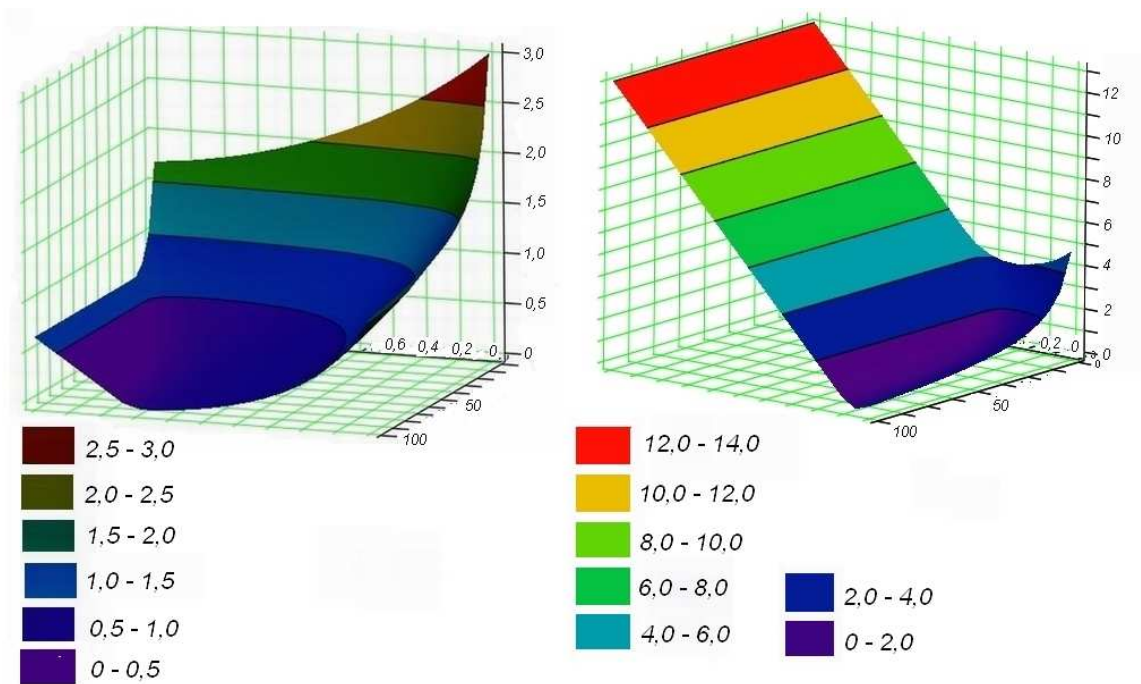


Рис. 10. График зависимости $\frac{U_{Tmax}}{E}$ при различных параметрах защитной RC-цепи (тиристор типа Т153-630, отключаемый ток 630 А (рис. а) и 6300 А (рис. б))

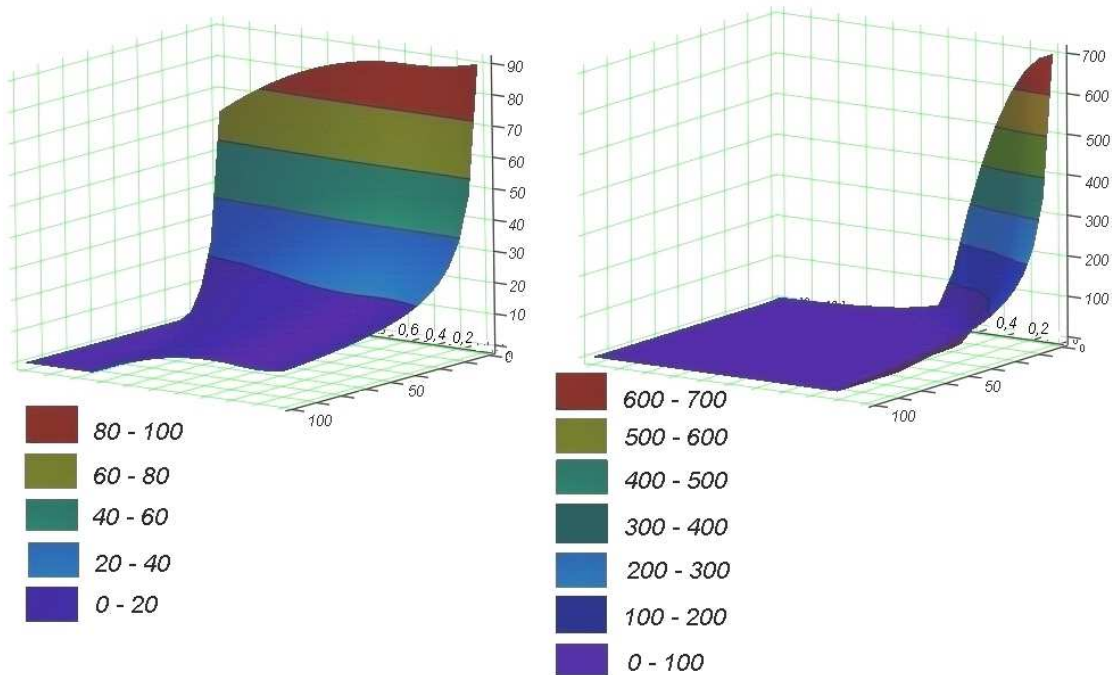


Рис. 11. График зависимости $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$ на тиристоре от параметров защитной RC-цепи (тиристор типа Т153-630, отключаемый ток – 3780 А (рис. а) и 6300 А (рис. б))

Таблица 4
 Параметры защитной RC-цепи для различных значений номинальных токов контактора
 ($\cos \varphi = 0,3$, коммутируемый ток – $10I_{ном}$)

Номинальный ток контактора, А	Тип тиристора и его класс	R_C , Ом	C , мкФ	$\frac{U_{Tmax}}{E}$	$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$, В/мкс
160	T161-160-8	62	0,5	1,43	18,6
250	T171-250-8	40	0,5	1,51	12,0
400	T143-400-9	15	1,5	1,59	18,6
630	T153-630-9	10	2,0	1,58	24,0

Из данной таблицы следует, что даже для этих достаточно высоких уровней перенапряжений необходимо применять конденсаторы, рассчитанные на работу в цепях переменного тока с относительно высокими ёмкостями. Как известно, такие конденсаторы имеют высокую стоимость и большие габариты, что несомненно скажется на массогабаритных и стоимостных показателях контактора. При этом видно, что уровень максимальных скоростей нарастания перенапряжений существенно ниже допустимых уровней для современных тиристорov, для которых этот показатель лежит в диапазоне (320 – 1000) В/мкс.

Выводы

В результате проведенных исследований коммутационных перенапряжений при отключении гибридных контакторов и критического анализа существующих методов их ограничения получены следующие результаты:

- показано, что существующая методика расчёта коммутационных перенапряжений не отличается требуемой точностью, так как в неполной мере учитывает динамические характеристики СПП, в первую очередь, зависимость процесса обратного восстановления СПП от скорости спада тока в их цепи и высокую устойчивость современных СПП к воздействию сверхвысоких скоростей нарастания напряжений, а также условия коммутации нагрузки этими приборами в составе гибридных контакторов;
- показано, что традиционные способы ограничения перенапряжений по тем же причинам не позволяют создавать малогабаритные, недорогие и высокоэффективные ограничители перенапряжений;
- предложена усовершенствованная методика расчёта величины коммутационных перенапряжений и скоростей их нарастания, учитывающая динамические характеристики полупроводниковых приборов и условия коммутации нагрузки;
- в связи с тем, что для ограничения рассчитанных перенапряжений необходимо применять конденсаторы, рассчитанные на работу в цепях переменного тока с относительно высокими ёмкостями, имеющие высокую стоимость и большие габариты, возникает предложение использовать совместно с защитной RC-цепью ещё и нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН), в качестве которого может быть использован варистор или встречно включенные стабилитроны. Это позволит существенно снизить ёмкость конденсатора при обеспечении приемлемого уровня перенапряжений, а также повысить устойчивость схемы к воздействиям внешних перенапряжений. В настоящее время наиболее энергоёмкими являются ОПН на основе оксидно-цинковых варисторов (СН2-2, РНС -60) [1]. Такие приборы имеют высокое быстроедействие и нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), обеспечивающую эффективную защиту ПК от перенапряжений на заданном уровне за счёт поглощения значительной дозы энергии, накопленной в индуктивности отключаемой сети. В нашем случае наиболее целесообразно включать варистор параллельно защитной RC-цепи.

Литература

1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравела, 2005 – 344 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2005 – 384 с.
3. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые порлупроводниковые приборы. М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
4. Электронный каталог продукции фирмы «Semicon»
5. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 528с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ
КОММУТИРОВАНИИ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ГИБРИДНЫМИ КОНТАКТОРАМИ

А.Г. Сосков, Н.О. Сабалаева, И.А. Соскова

Проведено дослідження комутаційних перенапружень, що прикладаються до силових напівпровідникових приладів напівпровідникового ключа гібридних контакторів змінного струму при комутації електричних кіл. Було запропоновано методіку розрахунку величини цих перенапружень, що враховує динамічні характеристики напівпровідникових приладів, а також умови комутації навантаження.

THE TREATMENT OF SWITCHING OVERVOLTAGES DURING COMMUTATION OF
ALTERNATING-CURRENT CIRCUITS BY HYBRID CONTACTORS

A.G. Soskov, N.O. Sabalaeva, I.A. Soskova

The switching overvoltages on power semiconductor devices in semiconductor switch of hybrid contactors during commutation of alternating-current circuits have been treated. The methods of calculating of overvoltages, which take account of dynamic characteristics of semiconductor devices and conditions of commutation of load have been proposed.