

РАСЧЁТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ГИБРИДНЫХ КОНТАКТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА И СПОСОБЫ ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

Проведено аналіз способів обмеження комутаційних перенапруг, що прикладаються до силових напівпровідникових приладів напівпровідникових ключів гібридних контакторів при комутації кіл постійного струму. Було запропоновано методику розрахунку параметрів обмежувачів перенапруг для цих кіл.

Проведен анализ способов ограничения коммутационных перенапряжений, прикладываемых к силовым полупроводниковым приборам полупроводниковых ключей гибридных контакторов при коммутации цепей постоянного тока. Предложена методика расчёта параметров ограничителей перенапряжений для этих цепей.

ВВЕДЕНИЕ

При отключении электрических цепей гибридными контакторами к силовым полупроводниковым приборам (СПП) их полупроводниковых ключей (ПК) в момент выключения прикладываются коммутационные перенапряжения. В гибридных контакторах постоянного тока, как и переменного, коммутационные перенапряжения обусловлены запасённой энергией в индуктивностях сети и нагрузки на момент коммутации. Однако, в связи с тем, что этот контактор отключает цепь при полном токе нагрузки, причём практически мгновенно, запасённая энергия будет существенно больше, и шунтировать её будет сложнее.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Анализ различных способов демпфирования коммутационных перенапряжений в цепях силовых коммутационных аппаратов постоянного тока, представленных в [1 - 3], показал, что в гибридных контакторах постоянного тока, выполненных с использованием полностью управляемых СПП, для ограниче-

ний перенапряжений до уровня, установленного для этого класса аппаратов (не более $2,5U_{\text{ном}}$), энергию, запасённую в индуктивности нагрузки, наиболее целесообразно рассеивать с помощью обратного диода, включенного параллельно нагрузке, а энергию, запасённую в индуктивности сети – на энергоёмких варисторах, включенных на входе контактора. Использование для этих цепей конденсаторов с большой ёмкостью не вполне приемлемо из-за их больших габаритов, высокой стоимости и низкой надёжности [1, 2].

Схема включения указанных ограничителей перенапряжений (ОП) приведена на рис. 1.

Параметры $L_{\text{Э}}$ и $R_{\text{Э}}$ выбираются в режиме предельного тока К.З. в цепи контактора.

$$R_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot 1,1}{I_{\text{К.З. max}}}, \quad L_{\text{К.З}} = L_{\text{Э}} = \tau R_{\text{Э}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети; $I_{\text{К.З. max}}$ – максимально допустимый ток К.З.; $L_{\text{К.З}}$ – индуктивность; τ – постоянная времени цепи К.З. ($\tau = 0,015$ с).

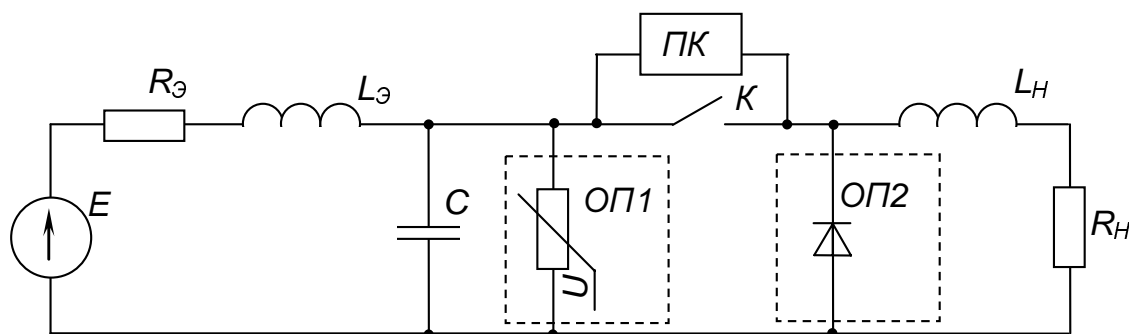


Рис. 1. Эквивалентная схема включения ограничителей перенапряжений ($L_{\text{H}}, R_{\text{H}}$ – индуктивность и активное сопротивление нагрузки, $L_{\text{Э}}$ и $R_{\text{Э}}$ – эквивалентные индуктивность и активное сопротивление сети)

Параллельно ОП1 (далее просто ОП) в этой схеме подключен конденсатор C , который ограничивает скорость нарастания коммутационного перенапряжения на СПП полупроводникового ключа (ПК) в момент разрыва тока нагрузки. Величина ёмкости этого конденсатора определяется из выражения

$$C = \frac{I_{\text{max}}}{\left(\frac{du_{\text{T}}}{dt}\right)_{\text{крит}}}, \quad (2)$$

где I_{max} – максимально допустимый коммутируемый ток в режиме редких коммутаций контактора (как

правило $I_{\max} = 4I_{\text{ном.р}}$); $I_{\text{ном.р}}$ – номинальный рабочий ток (как правило $I_{\text{ном.р}} = 0,6I_{\text{ном}}$); $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{\text{крит}}$ – максимально допустимая скорость нарастания напряжения на СПП.

Параметры варисторов, используемых в ОП должны удовлетворять неравенствам

$$\begin{cases} W_{\text{ст.мах}} < W_{\text{ст.доп}} \\ I_{\text{ст.мах}} < I_{\text{ст.доп}} \\ t_{\text{сп}} < t_{\text{доп}} \\ U_{\text{кл}} \geq \frac{U_{\text{ном}}}{0,85} \cdot 1,1 \end{cases}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ст.доп}}$, $t_{\text{доп}}$ – допустимые амплитуда и длительность импульса тока варистора, при которых его энергия $W_{\text{ст}}$ не превышает допустимую $W_{\text{ст.доп}}$; $W_{\text{ст.мах}}$ – максимальная энергия, выделяемая в варисторе; $I_{\text{ст.мах}}$ – максимальный ток варистора; $t_{\text{сп}}$ – время протекания тока через варистор (время спада); $U_{\text{кл}}$ – классификационное напряжение варистора.

Для реальных параметров контура коммутации гибридного контактора постоянного тока величины $I_{\text{ст}}$ и $W_{\text{ст}}$ могут значительно превысить допустимые $I_{\text{ст.доп}}$ и $W_{\text{ст.доп}}$. Например, для контактора на $I_{\text{ном}} = 630$ А, максимальный коммутируемый ток $I_{\text{ком}}$ в цепи в режиме редких коммутаций равен $4I_{\text{ном.р}}$, поэтому при $I_{\text{ном.р}} = 0,6I_{\text{ном}}$, $L_{\text{Э}} = 0,5$ мГн

запасённая энергия в сети $\frac{L_{\text{Э}}I_{\text{ком}}^2}{2} = 571$ Дж, в то время, как у варисторов серии СН2-2 $W_{\text{ст.доп.}} \leq 150$ Дж, а у ВС2-2 $W_{\text{ст.доп.}} = 350$ Дж [2].

Для увеличения допустимой энергии ОП предлагается использовать последовательно-параллельное соединение варисторов [1]. Такой ОП (рис. 2) содержит n параллельных ветвей, каждая из которых состоит из m последовательно соединённых варисторов $R_1 - R_m$ и одного балластного резистора R_6 , выравнивающего токи в параллельных ветвях.

Расчёт максимальной энергии $W_{\text{ст.мах}}$, выделяемой в одном варисторе ОП на рис. 2, а, выполняется для предельного случая неравномерности токораспределения в параллельных ветвях, которому соответствует установка в $(n-1)$ -ой ветви элементов с максимальными значениями параметров, а в оставшейся n -той ветви – с минимальными. При этом токи в $(n-1)$ -ой ветви будут минимальны, а ток в оставшейся n -ой ветви – максимальным. Очевидно, что и энергия, выделяемая в одном варисторе, пропорциональная квадрату тока [1, 2], будет максимальной для варистора, установленного в n -той ветви с максимальным током.

Расчётная схема замещения контура коммутации с ОП (рис. 2, а), имеющим заданное токораспределение, на стадии ограничения перенапряжения имеет вид (без учёта тока конденсатора C ОП, который из-за

малой величины его ёмкости практически не влияет на токораспределение в ОП), приведенный на рис. 2, б, где $L_{\text{Э}}$ – эквивалентная индуктивность контура коммутации ($L_{\text{Э}} = L_{\text{К.З.}}; R_{\text{Э}} \approx 0$);

$R_{\text{Эмах}} = mR_{\text{д.мах}} + R_{\text{б.мах}}$, $U_{\text{Эмах}} = mU_{\text{ст.мах}}$ – эквивалентные максимальные сопротивление и напряжение $(n-1)$ -ой ветви с минимальными токами $i_{\text{ст.мин}}$; $R_{\text{Эмин}} = mR_{\text{д.мин}} + R_{\text{б.мин}}$, $U_{\text{Эмин}} = mU_{\text{ст.мин}}$ – эквивалентные минимальные сопротивление и напряжение стабилизации n -той ветви с максимальными токами $i_{\text{ст.мах}}$; $R_{\text{дмах}}, R_{\text{дмин}}$ – максимальное и минимальное динамические сопротивления варисторов; $U_{\text{ст.мах}}, U_{\text{ст.мин}}$ – максимальное и минимальное напряжения стабилизации варисторов; $R_{\text{б.мах}}, R_{\text{б.мин}}$ – максимальное и минимальное сопротивления балластного резистора; K – ключ, имитирующий работу ОП (отключает ветви с токами $i_{\text{с.мин}}$ при спаде напряжения на ОП $u_{\text{оп}}$ ниже $U_{\text{Эмах}}$, т.е. в момент времени $t_{\text{з.к}}$).

Условие перетекания тока в ОП является нарастание напряжения $u_{\text{оп}}$ до величины $U_{\text{Эмин}}$, а условие замкнутого состояния ключа K и протекания тока во всех n ветвях является выполнение неравенства

$$I_{\text{ком}} > (U_{\text{Эмах}} - U_{\text{Эмин}}) / R_{\text{Эмин}}. \quad (4)$$

Опыт эксплуатации варисторов СН2-2 при расщеплении в них большой энергии, что и имеется в нашем случае, показал, что значение напряжения варистора $U_{\text{ст}}$ целесообразно выбирать по его ВАХ при токе $I_{1,0} = 1$ А, при этом его динамическое сопротивление находится из выражения

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{в100}} - U_{\text{ст}}}{I_{100}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{в100}}$ – напряжение на варисторе при токе $I_{100} = 100$ А,

а напряжение на варисторе – из выражения

$$U_{\text{в}} = U_{\text{ст}} + I_{\text{в}}R_{\text{д}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{в}}$ – ток варистора.

При выполнении неравенства (4) процесс, протекающий в схеме замещения (рис. 2, б) с замкнутым в интервале времени $0 \leq t \leq t_{\text{з.к}}$ (рис. 2, в) ключом K описывается системой уравнений

$$\begin{cases} E = L_{\text{Э}} \frac{di}{dt} + u_{\text{оп}} \\ u_{\text{оп}} = U_{\text{Эмин}} + i_{\text{ст.мах}}R_{\text{Эмин}} = U_{\text{Эмах}} + i_{\text{ст.мин}}R_{\text{Эмах}} \\ i = i_{\text{ст.мах}} + (n-1)i_{\text{ст.мин}} \end{cases}, \quad (7)$$

где $E = kU_{\text{ном}}$ – максимально допустимая э.д.с. сети ($k = 1,1$).

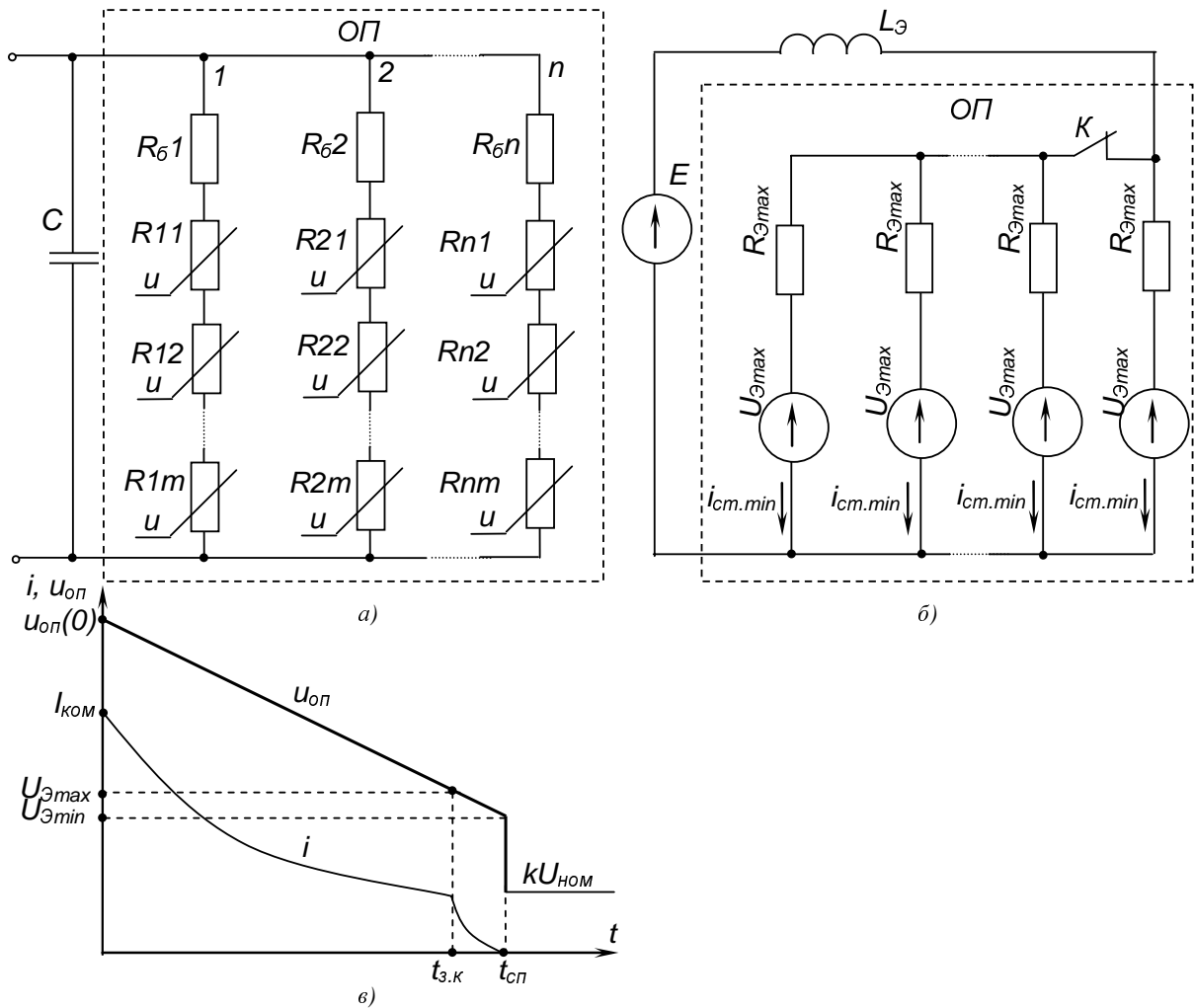


Рис. 2. Ограничитель перенапряжений с параллельно-последовательным соединением варисторов (а), расчётная схема замещения контура коммутации с ограничителем перенапряжений (б) и диаграмма её работы (в)

Решение с начальным условием $i(0) = I_{\text{КОМ}}$:

$$i_{\text{ст.мин}} = \rho i_{\text{ст.макс}} - I_{\text{н.б}}, \quad (8)$$

$$i = [1 + \rho(n-1)]i_{\text{ст.макс}} - (n-1)I_{\text{н.б}}, \quad (9)$$

$$i_{\text{ст.макс}} = Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*, \quad (10)$$

где $\rho = \frac{R_{\text{Эмин}}}{R_{\text{Эмакс}}}$; $I_{\text{н.б}} = (U_{\text{Эмакс}} - U_{\text{Эмин}})/R_{\text{Эмакс}}$ – ток небаланса;

$$I_* = \frac{U_{\text{Эмин}} - E}{R_{\text{Эмин}}}; \quad U_{\text{Эмин}} > E;$$

$$A = I_* + \frac{[I_{\text{КОМ}} + I_{\text{н.б}}(n-1)]}{1 + \rho(n-1)}; \quad \tau_{3,к} = \frac{[1 + \rho(n-1)]L_{\text{Э}}}{R_{\text{Эмин}}}.$$

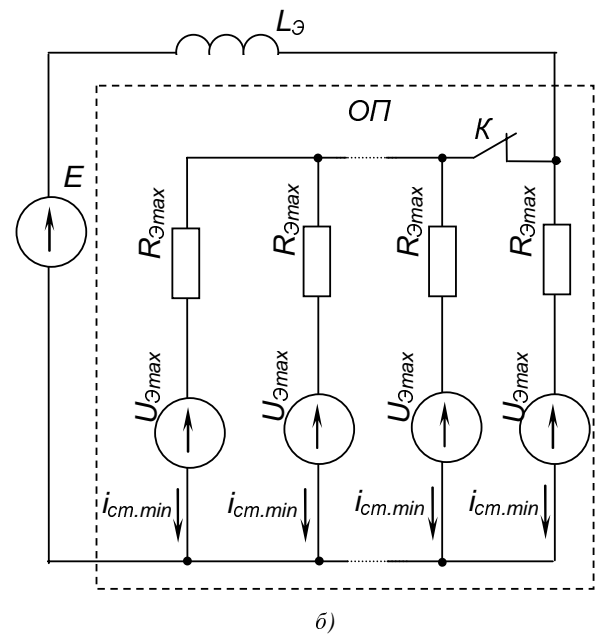
Амплитуда максимального тока варистора
 $I_{\text{ст.макс}} = i_{\text{ст.макс}}(0) = [I_{\text{КОМ}} + (n-1)I_{\text{н.б}}]/[1 + \rho(n-1)]. \quad (11)$

Амплитуда ограниченного ОП напряжения на входе контактора

$$U_{\text{в.макс}} = u_{\text{оп}}(0) = R_{\text{Эмин}}I_{\text{ст.макс}} + U_{\text{Эмин}} \leq 2,5U_{\text{НОМ}}. \quad (12)$$

Длительность замкнутого состояния ключа K найдём из решения уравнения $u_{\text{оп}} = U_{\text{Эмакс}}$,

$$t_{3,к} = \tau_{3,к} \ln \frac{\rho A}{I_{\text{н.б}} + \rho I_*}. \quad (13)$$



В интервале времени $0 \leq t \leq t_{3,к}$ (рис. 2, в) ключ K в схеме замещения разомкнут и ток i спадает до нуля. При этом процесс, протекающий в схеме замещения, описывается уравнениями [4]:

$$E = L_{\text{Э}} \frac{di}{dt} + u_{\text{оп}}, \quad u_{\text{оп}} = R_{\text{Эмин}}i + U_{\text{Эмин}}.$$

Решение с начальным условием $i(0) = \frac{I_{\text{н.б}}}{\rho}$:

$$i = -I_* + Be^{-t/\tau_{\text{р.к}}}, \quad (14)$$

где $B = I_* + \frac{I_{\text{н.б}}}{\rho}$, $\tau_{\text{р.к}} = \frac{L_{\text{Э}}}{R_{\text{Эмин}}}$.

Время разомкнутого состояния ключа K найдём из решения уравнения $i = 0$;

$$t_{\text{р.к}} = \tau_{\text{р.к}} \ln(1 + \frac{I_{\text{н.б}}}{\rho I_*}). \quad (15)$$

Время протекания тока через ОП

$$t_{\text{сп}} = t_{3,к} + t_{\text{р.к}}. \quad (16)$$

Максимальная энергия $W_{\text{ст.макс}}$, выделяемая в одном варисторе n -той ветви с током $i_{\text{ст.макс}}$

$$W_{ст. max} = \int_0^{t_{3,к}} i_{ст. max} (U_{ст. min} + R_{д. min} i_{ст. max}) dt + \int_0^{t_{р,к}} i (U_{ст. min} + R_{э. min} i) dt, \quad (17)$$

или

$$W_{ст. max} = \int_0^{t_{3,к}} (Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*) (U_{ст. min} + R_{д. min} (Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*)) dt + \\ + \int_0^{t_{р,к}} (-I_* + Be^{-t/\tau_{р,к}}) (U_{ст. min} + R_{э. min} (-I_* + Be^{-t/\tau_{р,к}})) dt. \quad (18)$$

Максимальная энергия $W_{б. max}$, выделяемая в балластном сопротивлении той же ветви

$$W_{б. max} = \int_0^{t_{3,к}} (Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*)^2 R_{б. min} dt + \int_0^{t_{р,к}} (-I_* + Be^{-t/\tau_{р,к}})^2 R_{б. min} dt. \quad (19)$$

Минимальная энергия $W_{ст. min}$, выделяемая в варисторе ($n-1$)-ой ветви с током $i_{ст. min}$

$$W_{ст. min} = \int_0^{t_{3,к}} \left[(Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*) \cdot \rho - I_{н.б} \right] \cdot \left[U_{ст. max} + R_{д. max} \cdot (Ae^{-t/\tau_{3,к}} - I_*) \right] dt. \quad (20)$$

Расчёт параметров ОП (рис. 2, а) производится с учётом выполнения ограничений (3) при работе гибридного контактора в режиме редких коммутаций и при максимально допустимом токе К.З. равном 10 кА (худший случай).

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В табл. 1 приведены значения параметров ОП, рассчитанные на основании следующей методики:

1. Предварительно выбирается тип варистора, используемого в ОП, основные параметры которого отвечают ограничениям (3), а также с помощью выражения (2) определяем величину ёмкости, шунтирующего ОП конденсатора.

2. Рассчитываем параметры, необходимые для расчёта ОП, при условии, что отклонение параметров $U_{ст.}$, $R_{д.}$ и $R_{б.}$ лежит в диапазоне $\pm 5\%$, $R_{б.} \approx R_{д.}$.

3. С помощью выражения (12) определяем $I_{ст. max} \leq I_{ст. доп}$ (для варистора СН2-2 $I_{ст. доп} \leq 120 A, W_{ст. доп} \leq 150 Дж$).

4. С помощью выражения (11) по известным $I_{ст. max}$ и $I_{ком} = 4I_{ном,р}$ находим количество параллельно включенных варисторов n , при этом n округляется в сторону большего целого числа. Уточняем $I_{ст. max}$ и $U_{в. max}$.

5. С помощью выражений (13), (15) и (16) определяем время протекания тока через варистор (время спада) $t_{сп.}$.

6. С помощью выражения (18) находим максимальную энергию, выделяемую в варисторе.

7. Если какой-либо параметр варистора не удовлетворяет принятым ограничениям, расчёт повторяется до тех пор, пока все параметры варистора не будут удовлетворять указанным ограничениям (3) и (12).

Анализ основных расчётных параметров, приведенных в табл. 1, показывает, что применение недорогих и малогабаритных энергоёмких варисторов типа СН2-2 при создании ОП позволяет ограничить уровень коммутационных перенапряжений до уровня ниже $2,5U_{ном}$ при коммутации гибридными контакторами постоянного тока предельных токов, равных $4I_{ном,р}$. При этом даже в самом напряжённом (по воздействию на ОП запасённой энергии в сети) контакторе на $I_{ном} = 630 A$ максимальная энергия, выделяемая в самом нагруженном варисторе, втрое меньше допустимой, а масса комплектующих изделий, входящих в этот ОП, составляет менее 0,1 кг при их цене порядка 85 грн.

В качестве примера отметим, что в ранее разработанном гибридном контакторе КП81-39 ($I_{ном} = 630 A$) его резистивно-ёмкостной ОП включает 14 параллельно включенных конденсаторов типа К75-17 (1000 В, 50 мкФ, масса 1,25 кг) [1]. Соответственно масса такого ОП составляет не менее 17,5 кг при стоимости 1330 грн., т.е. на несколько порядков по основным показателям превосходит рассмотренный нами варисторный ОП. Следует также добавить, что уровень ограничения перенапряжений этим ОП достигает $4,5U_{ном}$, т.е. превышает допустимый для коммутационных аппаратов уровень.

Расчётные значения параметров ОП, выполненного на базе варисторов СН2-2-330 В при $R_6=0,68$ Ом

Номинальный ток контактора $I_{ном}$, А	Максимальный коммутируемый ток $I_{ком}$, (в режиме редких коммутаций)	Количество параллельно включенных варисторов, шт.	Максимальный ток варистора $I_{ст.мах}$, А	Максимальное коммутационное перенапряжение $\frac{U_{в.мах}}{U_{ном}}$	Энергия в варисторе		Длительность протекания тока через варистор $t_{сп}$, мс	С, мкФ
					$W_{ст.мин}$, Дж	$W_{ст.мах}$, Дж		
100	$4 \cdot 0,6I_{ном}$	3	103,60	2,22	3,71	6,94	0,32	1,0
160		5	105,32	2,23	6,33	11,56	0,50	1,6
250		7	117,21	2,30	11,38	19,43	0,75	2,2
400		12	113,37	2,07	17,90	30,97	1,20	3,0
630		18	118,81	2,31	29,90	50,34	1,85	3,9

В рассматриваемом варисторном ОП могут применяться не только варисторы типа СН2-2, но и варисторы других фирм, которые удовлетворяют условиям (7), например, перспективными в этом плане являются варисторы типов SKP6,5...110СА и ВУЗ50А22...50К39 фирмы "Semicon". Так как они рассчитаны на $U_{кл} = 6,5-110$ В в ОП их необходимо включать последовательно-параллельно, при этом варистор, находящийся в самых неблагоприятных условиях работы, должен отвечать ограничениям (3).

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный авторами ОП с последовательно-параллельно включенными варисторами является высоконадёжным устройством, эффективно обеспечивающим ограничение коммутационных перенапряжений в цепях гибридных контакторов постоянного тока до уровня ниже $2,5U_{ном}$, и существенно превосходит по массогабаритным и стоимостным показателям ранее применяемые в гибридных контакторах резистивно-емкостные ограничители перенапряжений. Кроме того, они позволят понизить класс управляемых СПП, применяемых в ПК гибридных контакторов, с 10-го, что было ранее, до 6-го при применении контактора в сетях с напряжением 220 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. Учебник (под ред. А.Г.Соскова). – К: Каравелла, 2005. – 344 с.
2. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 252 с.
3. Дикань С.В., Намитоков К.К. Аппараты систем бесперебойного электроснабжения. – К.: Техника, 1989. – 174 с.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – 5 изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Поступила 09.02.2009

Сосков Анатолий Георгиевич, д.т.н.,
Сабалаева Наталья Олеговна, аспирант
Харьковская национальная академия городского хозяйства
Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ,
кафедра теоретической и общей электротехники
тел.(057) 707-31-11