

Показано, що в сучасних напівпровідникових апаратах постійного струму для обмеження комутаційних перенапруг до встановленого рівня доцільно запасену в індуктивності мережі енергію розсіювати за допомогою обмежувача перенапруг, виконаного на послідовно-паралельно увімкнених енергоємних варисторах. Розроблена методика розрахунку його параметрів та наведені приклади розрахунку

Ключові слова: комутаційна перенапруга, обмежувач перенапруг, варистор, напівпровідниковий апарат, напівпровідниковий прилад

Показано, что в современных полупроводниковых аппаратах постоянного тока для ограничения коммутационных перенапряжений до установленного уровня целесообразно запасённую в индуктивности сети энергию рассеивать с помощью ограничителя перенапряжений, выполненного на последовательно-параллельно включённых энергоёмких варисторах. Разработана методика расчёта его параметров, приведены примеры расчёта

Ключевые слова: коммутационное перенапряжение, ограничитель перенапряжений, варистор, полупроводниковый апарат, полупроводниковый прибор

УДК 621.316

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72533

СПОСОБИ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ В СУЧАСНИХ КОМУТАЦІЙНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ЇХ РОЗРАХУНОК

А. Г. Сосков

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: ansoskov@gmail.com

Н. О. Сабалаєва

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: natalysub@mail.ru

Я. Б. Форкун

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: yana_forkun@mail.ru

М. Л. Глебова

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: glebova_marina@mail.ru

*Кафедра теоретичної та загальної електротехніки
Харківський національний університет міського
господарства ім. О. М. Бекетова
вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

1. Вступ

У 80-х роках минулого сторіччя розпочався новий етап розвитку силової електроніки, пов'язаний зі створенням потужних повністю керованих напівпровідникових приладів (НП), і у першу чергу, двоопераційних GTO-тиристорів (Gate Turn-Off Thyristor), GCT-тиристорів (Gate Communicated Turn-Off Thyristor) та особливо силових швидкодіючих біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (БТІЗ) або IGBT-транзисторів (Insulated Gate bipolar Transistor). Високий рівень сучасних електронних технологій дав можливість організувати масове виробництво цих приладів у вигляді інтегральних модулів компактних конструкцій типу IGCT (на базі GCT-тиристорів) і IGBT (на базі БТІЗ), які характеризуються високою надійністю та доступною ціною. Поєднання силових приладів і схем їхнього керування в одному корпусі з різним ступенем інтеграції створило сприятливі умови для простої реалізації різних законів керування надпотужними електричними потоками [1, 2].

Вищезазначене стало потужним поштовхом до подальшого удосконалення раніше розроблених гібридних і безконтактних силових комутаційних напівпровідникових апаратів (НА) постійного струму шляхом

застосування в їхньому головному колі як ключів нових повністю керованих НП. Удосконалені апарати завдяки таким експлуатаційним якостям як висока комутаційна зносостійкість (до кількох млн. циклів), надвисокий рівень швидкодії (до кілька мкс), відсутність високовартісних та малонадійних систем примусової комутації розширені функціональні можливості та зручність поєднання з мікропроцесорними пристроями мають реальні перспективи стати конкурентоспроможними на світовому ринку незважаючи на їх високу вартість [3, 4].

У цих удосконалених НА постійного струму як безконтактних [5, 6], так і гібридних [7, 8], комутаційні перенапруги як і раніше будуть обумовлені енергією, що запасена в індуктивності мережі та навантаження в момент комутації. Однак, у зв'язку з тим, що вони викидають кола при значному навантаженні практично миттєво, накопичена енергія буде суттєво більшою та демпфувати її буде набагато складніше, ніж у раніше розроблених апаратах з примусовою ємнісною комутацією напівпровідникового ключа, де комутуючий конденсатор разом з основною функцією виконує ще й роль обмежувача перенапруг [9].

Тому актуальними є дослідження способів обмеження комутаційних перенапруг в зазначених апаратах та їх розрахунок. Матеріал представлятиме неод-

мінний інтерес для спеціалістів, що працюють у галузі електроапаратуобудування.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

У НА постійного струму для демпфування комутаційних перенапруг, що обумовлені накопиченою енергією в індуктивності мережі і навантаження на момент вимикання, практичного застосування знайшли такі способи:

- ті, що застосовують імпульсні конденсатори (конденсаторний) [10];
- ті, що застосовують такі ж конденсатори, але шунтовані лінійними резисторами (конденсаторно-резистивний) [10];
- ті, що застосовують енергоємні варистори (варисторний) [11, 12].

В усіх вищезазначених способах для розсіяння енергії, накопиченої в індуктивності навантаження, традиційно застосовується або зворотний діод, або зворотний тиристор (у випадку реверсного виконання апарату), які вмикаються паралельно навантаженню [13]. Перехідні електромагнітні процеси, що мають місце при цьому, досліджені достатньо докладно [11]. При цьому слід зазначити, що через високий рівень енергії, накопиченої в індуктивності навантаження в момент комутації, інші способи є непридатними через практичну неможливість їх реалізації (зазвичай, енергія, накопичена в індуктивності навантаження, набагато перевищує енергію, накопичену в індуктивності мережі) [14]. Тому нижче будемо аналізувати вищезазначені способи за умови, що необхідно демпфувати тільки енергію, накопичену в індуктивності мережі.

Застосування конденсаторів для обмеження комутаційних перенапруг шляхом переведення енергії, накопиченої в індуктивності мережі в потенційну енергію заряджених конденсаторів є класичним способом, що застосовується в НА постійного струму з примусовою ємнісною комутацією основного напівпровідникового ключа НА, виконаного на базі тиристорів [10]. Для одержання допустимого рівня перенапруг доводилось застосовувати дуже громіздкі, малонадійні та дорогі спеціальні імпульсні конденсатори, причому з обмеженим температурним робочим діапазоном (особливо це стосується імпульсних електролітичних конденсаторів). Цей спосіб може бути виправданим у випадках, коли в НА вже застосована ємнісна примусова комутація, однак, у сучасних НА, побудованих з використанням повністю керованих НП, застосування цього способу вже не буде доцільним [15].

Застосування разом із захисними конденсаторами лінійних резисторів, увімкнених за спеціальною схемою паралельно цим конденсаторам, дозволило суттєво знизити їхню ємність. Оскільки проблеми, пов'язані з недоліками спеціальних конденсаторів, але й ще додалися складнощі, пов'язані з необхідністю створення спеціальних схем комутації лінійних резисторів, що забезпечують як вмикання їх в потрібний момент, так і їх вимикання [10]. Тому цей спосіб також недоцільно застосовувати для зниження комутаційних перенапруг у сучасних НА.

Обмежувачі комутаційних перенапруг, виконаних на базі двох розглянутих способів, детально проаналізовані

в [10]. В даній роботі наведені методи їхнього розрахунку за умови обмеження комутаційних перенапруг до рівня, допустимого для НА постійного струму.

На даний час у зв'язку з розробкою енергоємних варисторів, що дозволяють в розсіювати енергію у кілька сотень кДж за прийнятних габаритів і вартості, створено достатньо сприятливі умови для застосування їх у сучасних комутаційних НА для розсіювання запасеної енергії в індуктивності мережі при вимиканні апарату [11, 16].

Наведений вище критичний аналіз різних способів демпфування комутаційних перенапруг у колах силових комутаційних апаратів постійного струму показав, що в комутаційних НА постійного струму, виконаних з використанням повністю керованих НП, для обмежень перенапруг до рівня, встановленого для цього класу апаратів (не більш $2,5U_{ном}$) [17], найбільш доцільно енергію, запасену в індуктивності навантаження, розсіювати за допомогою обмежувача перенапруг (ОП) ОП1, виконаного на основі зворотного діода, увімкненого паралельно навантаженню, а енергію, запасену в індуктивності мережі – за допомогою ОП2, виконаного на енергоємних варисторах, включених на вході апарату.

У зв'язку з відсутністю методик розрахунку варисторних ОП, що працюють у складі комутаційних НА постійного струму з застосуванням повністю керованих силових НА, виникає необхідність у детальному дослідженні електромагнітних перехідних процесів, що мають місце в обмежувачах цих апаратів при комутації навантаження, з метою розробки методики розрахунку параметрів варисторних ОП, що забезпечують зниження комутаційних перенапруг до рівня, встановленого для цього класу апаратів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка методики розрахунку параметрів обмежувачів перенапруг, виконаних на основі енергоємних варисторів при заданому рівні комутуваних перенапруг в НА постійного струму, виконаних на повністю керованих НП.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження перехідних процесів, що мають місце у вказаних обмежувачах перенапруг НА, постійного струму при комутації навантаження;
- визначити аналітичні вирази для розрахунку основних параметрів обмежувачів напруги і створення на їх основі інженерної методики розрахунку;
- навести приклади розрахунку параметрів ОП та комутаційних перенапруг для найбільш розповсюджених типів НА постійного струму.

4. Дослідження перехідних процесів в обмежувачах напруги на напівпровідникових ключах напівпровідникових апаратів при комутації навантаження

Еквівалентну схему вмикання ОП в силовому колі НА наведено на рис. 1.

Параметри R_e і L_e обираються в режимі граничного струму $k \cdot z$ у колі апарату:

$$R_e = \frac{U_{ном} \cdot 1,1}{I_{кзmax}}, \quad L_{кз} = L_e = \tau R_e, \quad (1)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі; $I_{КЗmax}$ – максимально допустимий струм к. з.; τ – постійна часу кола короткого замикання ($\tau=0,01$ с) [17].

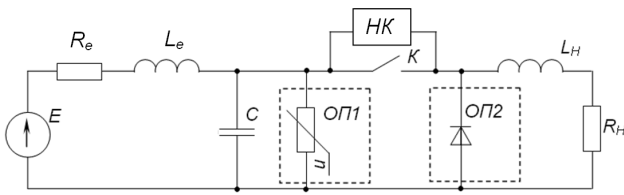


Рис. 1. Еквівалентна схема вмикання обмежувачів перенапруг (НК – напівпровідниковий ключ на повністю керованих приладах, К – механічний ключ, присутній тільки в гібридних апаратах, L_H, R_H – індуктивність та активний опір навантаження, L_e і R_e – еквівалентні індуктивність і активний опір мережі)

Паралельно ОП1 у цій схемі підключений конденсатор С, який обмежує швидкість зростання комутаційної перенапруги на НП НК у момент розриву струму навантаження. Величина ємності цього конденсатора визначається з очевидного виразу

$$C = \frac{I_{ком}}{\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{крит}}, \tag{2}$$

де $I_{ком}$ – максимально допустимий комутований струм апарату, наприклад для контактора та сучасного швидкодіючого вимикача (як правило $I_{ком}=4I_{ном.р}I_{ком}=4I_{ном.р}$) [4]; $I_{ном.р}$ – номінальний робочий струм (як правило $I_{ном.р}=0,6I_{ном}$); $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{крит}$ – максимально допустима швидкість зростання напруги на СНП.

Параметри варисторів, застосованих в ОП1 повинні задовольняти нерівностям [4]

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

де $t_{ст}$ – тривалість струму варистора; $I_{ст.доп}, t_{доп}$ – допустимі амплітуда й тривалість імпульсу струму варистора, при яких його енергія $W_{ст}$ не перевищує допустиму $W_{ст.доп}$; $W_{ст.мах}$ – максимальна енергія, яка виділяється у варисторі; $I_{ст.мах}$ – максимальний струм варистора; $U_{кл}$ – класифікаційна напруга варистора.

Для реальних параметрів контуру комутації НА постійного струму величини $I_{ст}$ і $W_{ст}$ можуть значно перевищити допустимі $I_{ст.доп}$ і $W_{ст.доп}$. Наприклад, для контактора на $I_{ном}=630$ А, максимальний комутований струм $I_{ком}$ у колі в режимі рідкісних комутацій дорівнює $4I_{ном.р}$, тому при $I_{ном.р}=0,6I_{ном}$, $L_e=0,5$ мГн, запасена енергія в індуктивності мережі $\frac{L_e I_{ком}^2}{2}=571$ Дж, у той же час, як у варисторів серії СН2-2 $W_{ст.доп} \leq 150$ Дж, а у ВС2-2 $W_{ст.доп}=350$ Дж [3].

Тому для збільшення допустимої енергії ОП1 автори пропонують ОП з послідовно-паралельним з'єднанням варисторів, який наведено на рис. 2.

Такий ОП містить п паралельних гілок, кожна з яких складається з m послідовно з'єднаних варисторів

RU1-RUm і одного баластного резистора R_6 , який вирівнює струми в паралельних вітках.

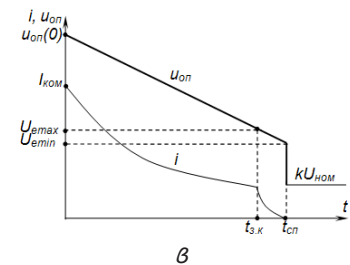
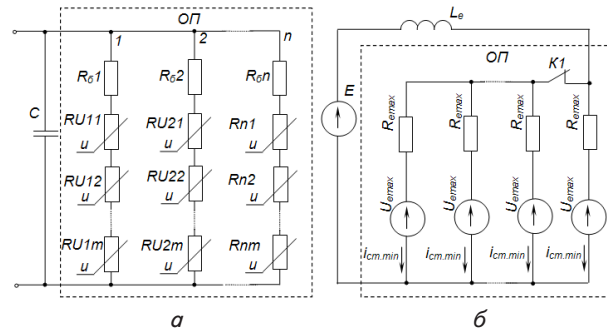


Рис. 2. Обмежувач перенапруг: а – схема з паралельно-послідовним з'єднанням варисторів, б – розрахункова схема заміщення контуру комутації з ОП, в – діаграма її роботи

Розрахунок максимальної енергії, що виділяється в одному варисторі ОП на рис. 2, а, виконується для граничного випадку нерівномірності струморозподілу в паралельних вітках, якому відповідає встановлення в n-ой вітці елементів з мінімальними значеннями параметрів, а в решті віток – з максимальними.

При цьому струм в n-ой вітці буде максимальним, а струми в решті віток будуть мінімальні. Очевидно, що і енергія, яка виділяється в одному варисторі, пропорційна квадрату струму, буде максимальною для варистора, встановленого в n-ой вітці з максимальним струмом.

Розрахункова схема заміщення контуру комутації з ОП1 (рис. 2, а), який має заданий розподіл струму, на стадії обмеження перенапруги має вигляд (без урахування струму конденсатора С ОП1, який через малу величину його ємності практично не впливає на розподіл струму в ОП1), наведений на рис. 2, б, де L_e – еквівалентна індуктивність контуру комутації ($L_e=L_{КЗ}$; $R_e \approx 0$); $R_{емах}=mR_{дмах}+R_{6мах}$, $U_{емах}=mU_{ст.мах}$ – еквівалентні максимальні опори і напруги (n-1)-ої вітки з мінімальними струмами $i_{ст.мін}$; $R_{емін}=mR_{дмін}+R_{6мін}$, $U_{емін}=mU_{ст.мін}$ – еквівалентні мінімальні опори й напруги стабілізації n-ой вітки з максимальними струмами $i_{ст.мах}$; $R_{дмах}, R_{дмін}$ – максимальний і мінімальний динамічні опори варисторів; $U_{ст.мах}, U_{ст.мін}$ – максимальна і мінімальна напруга стабілізації варисторів; $R_{6мах}, R_{6мін}$ – максимальний і мінімальний опори баластного резистора; К1 – ключ, який імітує роботу ОП1 (вимикає вітки зі струмами $i_{ст.мін}$ при спаданні напруги на ОП1 $u_{оп}$ нижче $U_{емах}$).

Умовою перетікання струму в ОП є зростання напруги $u_{оп}$ до величини $U_{емін}$, а умовою замкненого стану ключа К1 і протікання струму у всіх n вітках є виконання нерівності

$$I_{ком} > (U_{емах} - U_{емін}) / R_{емін}. \tag{4}$$

Досвід експлуатації варисторів СН2-2 при розсіюванні в них великої енергії показав, що значення U_{ct} варистора доцільно вибирати за його ВАХ при струмі $i_{1,0}=1$ А, а його динамічний опір визначається з виразу [4]

$$R_d = \frac{U_{B100} - U_{ct}}{I_{100}},$$

де U_{B100} – напруга на варисторі при струмі $i_{100}=100$ А.

Тоді напруга на варисторі U_B визначається з виразу $U_B = U_{ct} + I_B R_d$.

5. Визначення аналітичних виразів для розрахунку основних параметрів ОП і створення на їх основі інженерної методики розрахунку

При виконанні нерівності (3) процес, який протікає в схемі заміщення (рис. 2, а, $0 \leq t \leq t_{з.к}$) із замкнутим ключем К1 в інтервалі часу $0 \leq t \leq t_{з.к}$ (рис. 2, в) описується системою рівнянь [18]

$$\begin{cases} E = L_e \frac{di}{dt} + u_{оп}, \\ u_{оп} = U_{емин} + i_{ct,max} R_{емин} = U_{емакс} + i_{ct,min} R_{емакс}, \\ i = i_{ct,max} + (n-1)i_{ct,min}, \end{cases} \quad (5)$$

де $u_{оп}$ – напруга на обмежувачі перенапруг; $E=kU_{ном}$ – максимально допустима ЕДС мережі ($k=1,1$).

Нижче наведений розрахунок параметрів захисного кола.

Розв'язок з початковими умовами $i(0)=I_{ком}$:

$$i_{ct,min} = \rho i_{ct,max} - I_{н.б},$$

$$i = [1 + \rho(n-1)]i_{ct,max} - (n-1)I_{н.б},$$

$$i_{ct,max} = Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*,$$

де

$$\rho = \frac{R_{емин}}{R_{емакс}};$$

$$I_{н.б} = (U_{емакс} - U_{емин}) / R_{емакс} \text{ – струм небалансу};$$

$$I_* = \frac{U_{емин} - E}{R_{емин}};$$

$$U_{емин} > E; A = I_* + \frac{[I_{ком} + I_{н.б}(n-1)]}{1 + \rho(n-1)};$$

$$\tau_{з.к} = \frac{[1 + \rho(n-1)]L_e}{R_{емин}}.$$

Амплітуда максимального струму варистора

$$\begin{aligned} I_{ct,max} &= i_{ct,max}(0) = \\ &= [I_{ком} + (n-1)I_{н.б}] / [1 + \rho(n-1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Амплітуда обмеженої ОП напруги на вході апарата

$$\begin{aligned} U_{в,max} &= u_{оп}(0) = \\ &= R_{емин} I_{ct,max} + U_{емин} \leq 2,5U_{ном}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тривалість замкненого стану ключа К знайдемо з розв'язку рівняння $u_{оп} = U_{емакс}$,

$$t_{з.к} = \tau_{з.к} \ln \frac{\rho A}{I_{н.б} + \rho I_*}. \quad (8)$$

В інтервалі часу $0 \leq t \leq t_{з.к}$ (рис. 2, в) ключ К1 у схемі заміщення розімкнений і струм і спадає до нуля. При цьому процес, що протікає у схемі заміщення, описується рівняннями [18]:

$$E = L_e \frac{di}{dt} + u_{оп}, \quad u_{оп} = R_{емин} i + U_{емин}.$$

Розв'язок з початковими умовами

$$i(0) = \frac{I_{н.б}}{\rho}; \quad i = -I_* + Ve^{-t/\tau_{п.к}},$$

$$\text{де } V = I_* + \frac{I_{н.б}}{\rho}, \quad \tau_{п.к} = \frac{L_e}{R_{емин}}.$$

Час розімкненого стану ключа К1 знайдемо з розв'язку рівняння $i = 0$

$$t_{п.к} = \tau_{п.к} \ln \left(1 + \frac{I_{н.б}}{\rho I_*} \right). \quad (9)$$

Час протікання струму через ОП

$$t_{оп} = t_{з.к} + t_{п.к}. \quad (10)$$

Максимальна енергія $W_{ct,max}$, що виділяється в одному варисторі n-ої вітки зі струмом $i_{ct,max}$:

$$\begin{aligned} W_{ct,max} &= \int_0^{t_{з.к}} i_{ct,max} (U_{ct,min} + R_{д,min} i_{ct,max}) dt + \\ &+ \int_0^{t_{п.к}} i (U_{ct,min} + R_{е,min} i) dt, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} W_{ct,max} &= \int_0^{t_{з.к}} (Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*) (U_{ct,min} + R_{д,min} (Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*)) dt + \\ &+ \int_0^{t_{п.к}} (-I_* + Ve^{-t/\tau_{п.к}}) (U_{ct,min} + R_{е,min} (-I_* + Ve^{-t/\tau_{п.к}})) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Максимальна енергія $W_{б,max}$, що виділяється в багатному опорі тієї самої вітки

$$\begin{aligned} W_{б,max} &= \int_0^{t_{з.к}} (Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*)^2 R_{б,min} dt + \\ &+ \int_0^{t_{п.к}} (-I_* + Ve^{-t/\tau_{п.к}})^2 R_{б,min} dt. \end{aligned} \quad (12)$$

Мінімальна енергія $W_{ct,min}$, що виділяється в варисторі (n-1)-ої вітки зі струмом $i_{ct,minx}$:

$$\begin{aligned} W_{ct,min} &= \int_0^{t_{з.к}} \left[(Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*) \cdot \rho - I_{н.б} \right] \times \\ &\times \left[U_{ct,max} + R_{д,max} \cdot (Ae^{-t/\tau_{з.к}} - I_*) \right] dt. \end{aligned} \quad (13)$$

На основі одержаних вище виразів пропонується наступна інженерна методика розрахунку:

1. Заздалегідь вибирається тип варистора, який використовується в ОП, основні параметри якого відповідають обмеженням (3), а також за допомогою виразу (2) визначаємо величину ємності конденсатора, який шунтує ОП.

2. Розраховуються параметри, необхідні для розрахунку ОП, за умови, що відхилення параметрів $U_{ст}$, R_d і R_6 лежить в діапазоні $\pm 5\%$, $R_6 \approx R_d$.

3. За допомогою виразу (7) визначаємо $I_{ст.макс} \leq I_{ст.доп}$ (для варистора СН2-2 $I_{ст.доп} \leq 120$ А, $W_{ст.доп} \leq 150$ Дж).

4. За допомогою виразу (6) по відомих $I_{ст.макс}$ і $I_{ком}$ знаходимо кількість паралельно увімкнених варисторів n , при цьому n округляється у бік більшого цілого числа. Уточнюємо $I_{ст.макс}$ і $U_{вмакс}$.

5. За допомогою виразів (8)–(10) визначається час протікання струму через варистор (час спаду) $t_{сп}$.

6. За допомогою виразу (11) знаходимо максимальну енергію, яка виділяється у варисторі.

7. Якщо хоча б один з параметрів варистора не задовольняє прийнятним обмеженням, розрахунок повторюється до тих пір, поки всі параметри варистора не задовольнятимуть вказаним обмеженням (3) і (7).

Нижче наводяться результати розрахунків варисторного ОП і комутаційних перенапруг, виконаних за розробленою методикою для випадку застосування вказаного ОП в гібридних контакторах постійного струму на напругу 220 В, що є найбільш розповсюдженими силовими комутаційними НА.

Розрахунки проводились у середовищі Mathcad на основі таких вихідних даних $I_{ном.р} = 0,6I_{ном}$; $I_{ком} = 0,4I_{ном.р}$ (максимальний струм, комутований апаратом в режимі рідкісних комутацій); $I_{КЗмакс} = 10$ кА. При цьому як базовий обмежувальний елемент ОП застосовано варистор типу СН2-2-330 В.

В табл. 1 наведені основні розрахункові параметри ОП для даного випадку.

Аналіз розрахункових параметрів, наведених у табл. 1, показує, що застосування недорогих і малогабаритних енергоємних варисторів типу СН2-2 при створенні ОП дозволяє обмежити рівень комутаційних перенапруг до рівня нижче $2,5U_{ном}$ при комутації гібридними контакторами постійного струму граничних струмів, які дорівнюють $4I_{ном.р}$. При цьому навіть у самому навантаженому (за дією на ОП запасеної енергії в мережі) контакторі на $I_{ном} = 630$ А максимальна енергія, що виділяється в самому навантаженому варисторі, втричі менше допустимої, а маса комплектуючих виробів, що входять до складу цього ОП, складає менше 0,1 кг при їхній ціні порядку 10 USD [4].

Для порівняння, наприклад, в раніше розробленому гібридному контакторі КП81-39 ($I_{ном} = 630$ А) його резистивно-ємнісний ОП складається з 14 паралельно увімкнених конденсаторів типу К75-17 (1000 В, 50 мкФ, маса 1,25 кг) [1]. Відповідно маса такого ОП складає не менше 17,5 кг, тобто на декілька порядків за основними показниками перевершує розглянутий варисторний ОП. Слід також додати, що рівень обмеження перенапруг цим ОП сягає $4,5U_{ном}$, тобто перевищує допустимий для комутаційних апаратів рівень.

Звичайно, у варисторному ОП можуть застосовуватися не тільки варистори типу СН2-2, але й варистори інших фірм, наприклад, перспективними в цьому плані є варистори типів SKP6,5.110CA і BYZ50A22.50K39 фірми «Semicon». Оскільки вони розраховані на $U_{кл} = 6,5-110$ В, то їх в ОП необхідно включати послідовно-паралельно, при цьому варистор, що знаходиться в найнесприятливіших умовах роботи, повинен відповідати обмеженням (3).

6. Аналіз результатів дослідження комутаційних перенапруг в силових НА постійного струму

Основною перевагою проведених досліджень є те, що в результаті було розроблено інженерну методику розрахунку параметрів варисторних обмежувачів перенапруг гібридних і безконтактних НА постійного струму при заданому для цього класу апаратів рівні допустимих перенапруг. Слід також зазначити, що результати цього дослідження разом з приведеними раніше дослідженнями теплового режиму силових кіл, що працюють в НА [19], дозволяють з високою точністю і невеликими витратами часу вибирати повністю керовані НП за струмом і за напругою в процесі проектування сучасних комутаційних НА постійного струму, тобто вирішувати основні завдання цього проектування.

Однак результати проведених досліджень розповсюджуються тільки на низьковольтні НА (до 1000 В), тому їх проблематично розповсюдити на НА, що розраховані на більш високу напругу, що стало можливим у зв'язку з появою високовольтних НП, виконаних на основі карбіду кремнію [8]. Автори у подальшому припускають можливість продовження своїх досліджень стосовно цього питання з метою виключення вказаного недоліку.

Таблиця 1

Основні розрахункові параметри ОП

Номинальний струм контактора $I_{ном}$, А	Кількість паралельно увімкнених варисторів, шт	Максимальний струм варистора $I_{ст.макс}$, А	Тривалість протікання струму через варистор $t_{сп}$, мс	Максимальна комутаційна перенапруга $\frac{U_{вмакс}}{U_{ном}}$	Енергія у варисторі		С, мкФ	R_6 , Ом
					$W_{ст.мін}$, Дж	$W_{ст.макс}$, Дж		
100	3	103,60	0,32	2,22	3,71	6,94	1,0	0,68
160	5	105,32	0,50	2,23	6,33	11,56	1,6	
250	7	117,21	0,75	2,30	11,38	19,43	2,2	
400	12	113,37	1,20	2,07	17,90	30,97	3,0	
630	18	118,81	1,85	2,31	29,90	50,34	3,9	

Практичні рекомендації, які впливають з результатів даного дослідження, та методики розрахунку застосовуються на ЗАТ «ЕНАС» (м. Харків, Україна) при модернізації гібридних контакторів постійного струму серії КП81 з метою суттєвого зниження габаритів і вартості. Дана робота проходить стадію розробки конструкторської документації.

7. Висновки

1. Показано, що запропонований ОП з послідовно-паралельно увімкненими варисторами є високонадійним пристроєм, який ефективно забезпечує обмеження комутаційних перенапруг у колах силових НА постійного струму до рівня нижче $2,5U_{ном}$, і істотно перевищує за масогабаритними і вартісними показниками раніше застосовані в напівпровідникових контакторах резистивно-ємнісні обмежувачі перенапруг. Крім того,

вони дозволяють знизити клас повністю керованих СНП, вживаних у НК напівпровідникових апаратів на напругу 220 В, з 10-го, що було раніше, до 6-го.

2. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів ОП з послідовно-паралельно увімкненими варисторами, при цьому, на відміну від раніше досліджених випадків, в розрахунку розглядається тільки найгірший випадок розподілення варисторів по вітках з різними відхиленнями їх параметрів від номінальних. Це дозволяє шляхом достатньо простих розрахунків створювати ОП, що забезпечує придатний рівень комутаційних перенапруг НА постійного струму в різних режимах роботи, що робить її доступною для широкого кола спеціалістів.

3. Розроблена методика розрахунку окрім зазначеного вище може знайти використання у розрахунках перенапруг на повністю керованих СНП, що працюють в імпульсному режимі у складі пристроїв силової електроніки.

Література

1. Розанов, Ю. К. Силовая электроника [Текст]: учебник / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
2. Holroyd, F. W. Power Semiconductor Devices for Hybrid Breakers [Text] / F. W. Holroyd, V. A. K. Temple // Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions. – 1982. – Vol. PAS-101, Issue 7. – P. 2103–2108. doi: 10.1109/tpas.1982.317427
3. Сосков, А. Г. Усовершенствованные силовые коммутационные полупроводниковые аппараты низкого напряжения [Текст]: монография / А. Г. Сосков. – Харьковская национальная академия городского хозяйства, 2011. – 156 с.
4. Сосков, А. Г. Гібридні контактори низької напруги з покращеними техніко-економічними характеристиками [Текст]: монографія / А. Г. Сосков, Н. О. Сабалаєва. – Харківська національна академія міського господарства, 2012. – 268 с.
5. Storasta L. Optimized Power Semiconductors for the Power Electronics Based HVDCBreaker Application [Text] / L. Storasta, M. J. Haefner, F. Dugal, E. Tsyplakov, M. Callavik // PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management 2015. – P. 1–7.
6. Tanaka, Y. Development of semiconductor switches (SiC-BGSIT) applied for DC circuit breakers [Text] / Y. Tanaka, A. Takatsuka, T. Yatsuo, Y. Sato, H. Ohashi // 2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2013. – P.1–4. doi: 10.1109/icepe-st.2013.6804323
7. Yang B. A hybrid circuit breaker for DC-application [Text] / B. Yang, Y. Gao, X. Wei, Z. He, L. Chen, Y. Shan // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015. – P. 187–192. doi: 10.1109/icdcm.2015.7152036
8. Huang, A. Design and development of a 7.2 kV/200A hybrid circuit breaker based on 15 kV SiC emitter turn-off (ETO) thyristor [Text] / A. Huang, P. Chang, S. Xiaoqing // 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015. – P. 306–311. doi: 10.1109/ests.2015.7157909
9. Сосков, А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита [Текст]: учебник / А. Г. Сосков, И. А. Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.
10. Соскова, И. А. Расчёт перенапряжений в полупроводниковых ключах электронных аппаратов постоянного тока с учётом предвключений индуктивности сети [Текст] / И. А. Соскова, П. Н. Алаев // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2001. – № 14. – С. 323–329.
11. Magnusson, J. On the use of metal oxide varistors as a snubber circuit in solid-statebreakers [Text] / J. Magnusson, A. Bissal, G. Engdahl, R. Saers, Z. Zichi, L. Liljestrand // IEEE PES ISGT Europe 2013, 2013. – P. 1–4. doi: 10.1109/isgteurope.2013.6695454
12. Hassanpoor A. Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker [Text] / A. Hassanpoor, J. Hafner, V. Jacobson // 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), 2014. – P. 3667–3673. doi: 10.1109/ipecc.2014.6870025
13. Бурман, А. П. Электрические и электронные аппараты. В 2 томах. Том 2. Силовые электронные аппараты [Текст]: учебник / А. П. Бурман и др.; под ред. Ю. К. Розанова. – М.: узд. центр. «Академия», 2010. – 320 с.
14. Hassanpoor, A. Technical Assessment of Load Commutation Switch in Hybrid HVDCBreaker [Text] / A. Hassanpoor, J. Hafner, V. Jacobson // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Vol. 30, Issue 10. – P. 5393–5400. doi: 10.1109/tpel.2014.2372815
15. Сосков, А. Г. Сверхбыстродействующие бесконтактные выключатели на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах [Текст] / А. Г. Сосков, П. Н. Алаев, И. А. Соскова // Електротехніка і Електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 46–50.

16. Сосков, А. Г. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутировании цепей переменного тока гибридными контакторами [Текст]: сб. тез. докл. межд. науч.-техн. Интернет-конф. / А. Г. Сосков, Н. О. Сабалаева, И. А. Соскова // «Новейшие технологии в электроэнергетике, 2009. – С. 28.
17. Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс [Текст]: навч. пос. / Б. В. Клименко. – Х.: Точка, 2012. – 340 с.
18. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей. 5 изд. перераб. и доп. [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
19. Сосков, А. Г. Розрахунок теплового режиму напівпровідникових приладів в умовах роботи у складі напівпровідникових апаратів [Текст] / А. Г. Сосков, М. Л. Глебова, Н. О. Сабалаева, Я. Б. Форкун // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 5, № 8 (71). – С. 58–66. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27983