

Виконані дослідження комутаційних перенапруг, прикладених до напівпровідникових ключів напівпровідникових апаратів змінного струму при комутації електричних кіл. Запропонована уточнена методика розрахунку величини цих перенапруг для напівпровідникових ключів, захищених захисними RC-колами разом з варисторами, яка враховує як динамічні характеристики силових приладів напівпровідникових ключів, так і різних варіантів виконання останніх. Методика дозволяє значно підвищити точність розрахунку параметрів захисних кіл. Наведені приклади розрахунку комутаційних перенапруг для найбільш розповсюджених умов роботи напівпровідникових апаратів

Ключові слова: напівпровідниковий апарат, комутаційні перенапруги, захисне RC-коло, варистор, методика розрахунку

Выполнены исследования коммутационных перенапряжений, прикладываемых к полупроводниковым ключам полупроводниковых аппаратов переменного тока при коммутации электрических цепей. Предложена уточнённая методика расчёта величины этих перенапряжений для полупроводниковых ключей, защищённых защитными RC-цепями с варисторами, учитывающая как динамические характеристики силовых приборов полупроводниковых ключей, так и разных вариантов исполнения последних. Методика позволяет значительно повысить точность расчёта параметров защитных цепей. Приведены примеры расчёта коммутационных перенапряжений для наиболее распространённых условий работы полупроводниковых аппаратов

Ключевые слова: полупроводниковый аппарат, коммутационные перенапряжения, защитная RC-цепь, варистор, методика расчёта

УДК 621.316

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.63765

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

А. Г. Сосков

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: ansoskov@gmail.com

Н. О. Сабалаєва

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: natalysub@mail.ru

М. Л. Глєбова

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: glebova_marina@mail.ru

Я. Б. Форкун

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: yana_forkun@mail.ru

*Кафедра теоретичної та загальної електротехніки

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова
вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

1. Вступ

Електричні апарати (ЕА) складають основу комплектних пристроїв, призначених для прийому, регулювання й розподілу потоків електричної енергії та інформації. Враховуючи ту ключову роль, яку відіграють комутаційні електричні апарати в цих процесах, до якості їхньої роботи ставляться високі вимоги. В умовах сучасного виробництва, що характеризується високою інтенсифікацією технологічних процесів, класичні електромеханічні або контактні комутаційні апарати (КА), як було зазначено в [1], не завжди в змозі задовольняти жорстким вимогам, що до них ставляться.

Застосування як ключів силових напівпровідникових приладів в апаратобудуванні з використанням для їхнього керування елементів мікросхемотехніки та

мікропроцесорної техніки дозволило на основі нових принципів побудови ЕА покращити багато параметрів нових створених пристроїв, у тому числі набагато підвищити комутаційну зносостійкість і швидкодію, а також якісно розширити їхні функціональні можливості. Ці пристрої на відміну від електромеханічних апаратів в наш час називаються напівпровідниковими апаратами (НА). Вони бувають як безконтактними, так і гібридними.

В комутаційних НА як безконтактних, так і гібридних, силові напівпровідникові прилади (СНП) входять до складу НК, що забезпечують бездугову комутацію потоків електричної потужності, тобто надійно виконують основну силову функцію комутаційного апарата [2]. Як СНП у вказаних ключах застосовуються одноопераційні прилади (тиристо-

ри, симістори, оптронні тиристори) або двоопераційні прилади (IGBT-транзистори, ГТО-тиристори, IGBT-тиристори) [3].

При вимиканні електричних кіл комутаційними НА до СНП їхніх НК у момент вимикання прикладаються так звані комутаційні перенапруги.

2. Літературний огляд та постановка проблеми

Комутаційні перенапруги, прикладені до СНП, обумовлені енергією, що накопичена в індуктивних елементах як мережі живлення, так і самого навантаження на момент розмикання кола. Очевидно, що величина комутаційних перенапруг визначатиметься швидкістю спаду струму в колі, що комутується, і тому при застосуванні в НК сучасних швидкодіючих СНП вона може істотно перевищувати напругу мережі живлення. Оскільки вартість СНП визначається не тільки струмом, на який вони були розраховані [4], але й класом приладу, що обумовлює величину напруги, яку в змозі блокувати прилад, необхідним є застосування спеціальних заходів зі зниження цих перенапруг. Зазвичай з цією метою застосовуються захисні RC-кола (снабери) й нелінійні обмежувачі напруги (варистори, стабілітрони тощо).

Існуючі методики розрахунку комутаційних перенапруг, що виникають на НК напівпровідникових апаратів при комутаціях активно-індуктивних навантажень (найгірший випадок) не в повній мірі враховують різні варіанти виконання цих апаратів [4], а також достатньо спрощено враховують динамічні характеристики сучасних СНП, що входять до складу НК цих апаратів.

В результаті вибрані за цими методиками СНП мають завищений клас за напругою, а відповідно й завищену вартість [4].

Тому виникає необхідність у детальному аналізі перехідних процесів при виникненні комутаційних перенапруг і необхідність більш повного урахування як різних варіантів виконання апаратів, так і динамічних характеристик СНП при розрахунку перенапруг на них.

Комутаційні перенапруги, які виникають при вимиканні НА змінного струму активно-індуктивних кіл, в першу чергу обумовлені процесами, що протікають в СНП цих апаратів при їх вимиканні. Як показано в [5], СНП в процесі вимикання не відразу відновлюють відмикаючі властивості у зворотному напрямку. Якщо прилад переводиться в непровідний стан під дією зворотної напруги, то протягом певного часу зворотний струм зростає до значення, що значно перевищує статичний зворотний струм, і протягом цього часу прилад не здатний сприймати зворотну напругу.

Процес зворотного відновлення (рис. 1) умовно можна поділити на два етапи: до моменту досягнення зворотним струмом максимального значення і далі до встановлення статичного зворотного струму (на рис. 1, i_{rr} – струм зворотного відновлення, I_{RM} – амплітуда зворотного струму).

Таким чином, час зворотного відновлення t_{rr} складається з часу запізнювання зворотної напруги t_s , протягом якого СНП ще знаходиться у провідному стані, і часу спаду зворотного струму t_f , а заряд відновлення Q_{rr} – із заряду запізнювання Q_s і залишкового заряду Q_f .

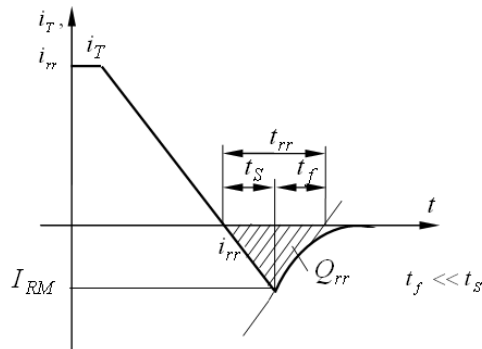


Рис. 1. Характеристика процесу зворотного відновлення СНП

У відповідності з [5] час зворотного відновлення і заряд відновлення при незначному опорі кола комутації і малих швидкостях спаду струму СНП, що має місце в комутаційних НА змінного струму, зв'язані між собою співвідношеннями:

$$I_{RM} = \sqrt{2Q_{rr} \left(-\frac{di_T}{dt} \right)}; t_{rr} = \frac{I_{RM}}{\left(-\frac{di_T}{dt} \right)}; t_f \ll t_s, \quad (1)$$

де di_T/dt – швидкість зміни зворотного струму.

В процесі спаду зворотного струму на часовому відрізку t_f і виникають комутаційні перенапруги, обумовлені енергією, яка була запасена в індуктивних елементах комутаційного кола при струмі I_{RM} . Для їх обмеження застосовуються, як було зазначено вище, захисні RC-кола, включені паралельно СНП, до яких комутується зворотний струм з кола СНП. Крім того, зазначені кола знижують швидкість зростання перенапруг, що також покращує умови роботи СНП [6, 7].

Існуючі методики розрахунку комутаційних перенапруг, а також параметрів захисних кіл, не характеризуються необхідною точністю, оскільки не в повній мірі враховують динамічні характеристики СНП [8], а також умови комутації навантаження цими приладами у складі комутаційних НА змінного струму [9]. У деяких випадках навіть пропонується постійний коефіцієнт, що задає максимальний рівень перенапруг [10].

У результаті, через ризик виходу з ладу НК у процесі комутації, клас СНП, що застосовуються в комутаційних НА, як правило, виявляється завищеним [11], а параметри захисних кіл вибрані з недостатньо обґрунтованим запасом [12], що природно призводить до підвищення вартості й габаритів апарату [2].

У зв'язку з вищезазначеним виникає необхідність в уточненні існуючих методик розрахунку комутаційних перенапруг в НА.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є створення уточнених методик розрахунку комутаційних перенапруг та параметрів захисних кіл НА при вимиканні активно-індуктивних кіл змінного струму з урахуванням як динамічних характеристик СНП напівпровідникових ключів, так і їх різних варіантів виконання.

Серед задач, розв'язання яких необхідно для досягнення поставленої мети, є:

- дослідження процесу вимикання найбільш розповсюджених СНП і одержання узагальненого аналітичного виразу, що характеризує цей процес;
- дослідження комутаційних перенапруг в НА з захисними RC-колами при вимиканні активно-індуктивних кіл з урахуванням динамічних характеристик СНП для різних варіантів вмикання НК, а також розробка уточненої методики їх розрахунку;
- дослідження комутаційних перенапруг в НА із застосуванням додаткових варисторів разом з RC-колами для захисту від перенапруг та розробка уточненої методики їх розрахунку;
- наведення прикладів розрахунку комутаційних перенапруг для найбільш розповсюджених умов роботи НА.

4. Дослідження комутаційних перенапруг, що виникають на напівпровідникових ключах комутаційних напівпровідникових апаратів змінного струму при вимиканні активно-індуктивного навантаження

Для обґрунтованого вибору параметрів елементів захисного RC-кола необхідно перш за все досліджувати перехідний процес на СНП напівпровідникових ключів при шунтуванні їх RC-колом з урахуванням розглянутого процесу вимикання СНП, а потім вже на підставі прийнятих обмежень за рівнем перенапруг знайти характерні залежності, що дозволяють обґрунтовано вибирати параметри цих кіл.

Оскільки НК напівпровідникових апаратів змінного струму виконуються в основному на тиристорах, то на еквівалентній схемі (рис. 2) як СНП розглядаються потужні тиристори (на рис. 2 $U_e = U_{em} \sin(\omega t + \phi)$ – напруга, що відновлюється, де U_{em} – амплітуда еквівалентної напруги, що прикладається до НК у момент проходження струму в його колі через нуль і $\phi = \arctg \frac{\omega L_e}{R_e}$; R_c та C – опір та ємність захисного RC-кола; L_e та R_e – еквівалентні індуктивність та опір кола, що розмикається).

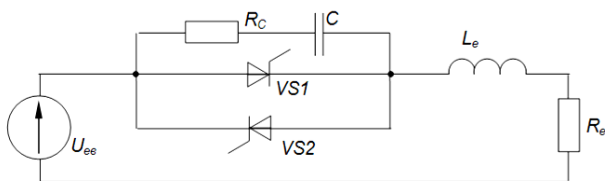


Рис. 2. Еквівалентна схема для розрахунку параметрів захисного RC-кола

Значення U_{em} , L_e , R_e для різних схем трифазних НК (рис. 3) обґрунтовані в [1] і наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення U_{em} , L_e , R_e для різних варіантів виконання трифазних силових гібридних ключів

Виконання	U_{em}	L_e	R_e
Рис. 3, а	$\sqrt{2}U_{\phi}$	$L_{\phi H}$	$R_{\phi H}$
Рис. 3, б	$1,5 \cdot \sqrt{2}U_{\phi}$	$1,5L_{\phi H}$	$1,5R_{\phi H}$
Рис. 3, в	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}U_{\phi}$	$2L_{\phi H}$	$2R_{\phi H}$
Рис. 3, г	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}U_{\phi}$	$2L_{\phi H}$	$2R_{\phi H}$

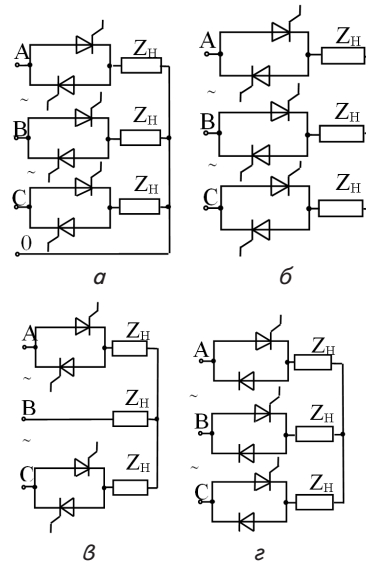


Рис. 3. Варіанти виконання трифазних силових гібридних ключів: а – схема з нульовим проводом; б, в, г – схеми без нульового проводу, (Z_H – опір навантаження)

На рис. 4. наведена осцилограма процесу вимикання тиристора, шунтованого RC-колом (на рис. 4 i_T – миттєве значення струму через тиристор, u_T – напруги на тиристорі, u_{eB} – напруги, що відновлюється). З осцилограми струму виходить, що вимикання тиристора відбувається не у момент проходження струму через нуль, а після протікання через тиристор зворотного струму протягом часу t_{rr} (при цьому $t_f \rightarrow 0$).

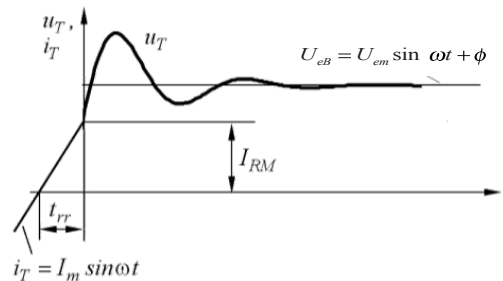


Рис. 4. Осцилограма процесу вимикання тиристора

Оскільки швидкість спаду струму в тиристорі при проходженні його через нуль дорівнює $\frac{di_T}{dt} = I_m \omega$ (I_m – амплітуда струму, що вимикається), то у відповідності до (1)

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

Значення Q_{rr} для конкретних груп типів тиристорів залежить від швидкості спаду струму в їхньому колі й наведені в довідковій літературі у вигляді відповідних графічних залежностей.

Для спрощення розрахунку значень I_{RM} була проведена апроксимація графічних залежностей $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ для груп типів тиристорів, які можуть бути застосовані при створенні НА змінного струму ($Q_{rr}^* = f\left(\frac{di}{dt}\right) = \frac{Q_{rr}}{Q_{rr0}}$ – заряд зворотного відновлення у відносних одиницях, де Q_{rr0} – довідкове значення заряду зворотного відновлення,

отримане при $\frac{di}{dt} = 5 \frac{A}{\mu s}$) [5]. Результати апроксимації у вигляді аналітичних виразів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати апроксимації графічних залежностей

$Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ для груп типів тиристорів, що використовуються у комутаційних НА

Групи тиристорів	Типи тиристорів	$Q_{rr}^* = f\left(\frac{di}{dt}\right)$
1	T142-63, T142-80	$Q_{rr}^* = 0,269\left(1 - e^{-0,052\frac{di}{dt}}\right) + 1,079\left(1 - e^{-0,425\frac{di}{dt}}\right)$
2	T151-100, T161-125, T161-160, T171-200, T171-250, T171-320	$Q_{rr}^* = 1,252\left(1 - e^{-0,023\frac{di}{dt}}\right) + 1,164\left(1 - e^{-0,23\frac{di}{dt}}\right)$
3	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	$Q_{rr}^* = 1,994\left(1 - e^{-0,038\frac{di}{dt}}\right) + 0,932\left(1 - e^{-0,278\frac{di}{dt}}\right)$
Узагальнена характеристика		$Q_{rr}^* = 1,252\left(1 - e^{-0,027\frac{di}{dt}}\right) + 1,084\left(1 - e^{-0,299\frac{di}{dt}}\right)$

На рис. 5 наведені криві зміни заряду зворотного відновлення у відносних одиницях залежно від швидкості спаду струму для вказаних груп типів тиристорів.

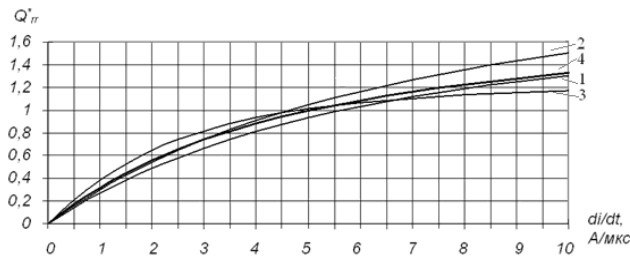


Рис. 5. Графіки залежностей $Q_{rr}^* = f\left(\frac{di}{dt}\right)$, одержані

методом апроксимації для груп тиристорів:
 1 – 1-а група; 2 – 2-а група; 3 – 3-я група;
 4 – узагальнена характеристика

Найбільше відхилення серед залежностей 1, 2 та 3 від узагальненої складає 1,7 % при $\frac{di}{dt} = 5 \frac{A}{\mu s}$, а при $\frac{di}{dt} = 10 \frac{A}{\mu s}$ до 10 %. Такі відхилення при визначенні значення Q_{rr} дозволяють розраховувати амплітуду зворотного струму з незначною похибкою (менше 5 %),

що цілком допустимо при розрахунку максимального значення перенапруги на тиристорі [5].

На рис. 6 показані залежності амплітуди зворотного струму від відношення струму, що вимикається, до номінального для тиристорів типу T161-160, T171-250, T143-400, T153-630, розраховані за допомогою виразу (2).

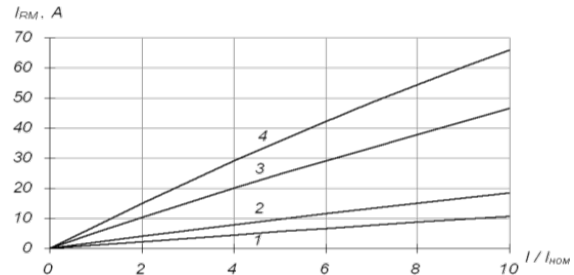


Рис. 6. Залежність амплітуди зворотного струму I_{RM} від кратності струму для різних груп тиристорів:
 1 – T161-160, $I_{НОМ} = 160$ А; 2 – T171-250, $I_{НОМ} = 250$ А;
 3 – T143-400, $I_{НОМ} = 400$ А; 4 – T153-630, $I_{НОМ} = 630$ А

Залежності на рис. 6 застосовуються в наведених нижче методиках розрахунку.

4.1. Уточнена методика розрахунку комутаційних перенапруг на напівпровідникових ключах, зашунтованих захисними RC-колами, та приклади розрахунку цих перенапруг для найбільш розповсюджених умов роботи НА

Розглянемо перехідний процес на тиристорах НК комутаційного НА при відключенні активно-індуктивного кола при шунтуванні його RC-колом (рис. 7). Цей процес у відповідності до [13] зображується наступним рівнянням:

$$L_e \frac{di}{dt} + R_c i + \frac{1}{C} \int i dt = E, \quad (3)$$

де $E = kU_{em} \cdot \sin \phi$ – напруга, що відновлюється; $k = U_{\phi} / U_{\phi ном}$ – величина відхилення фазної напруги від номінальної.

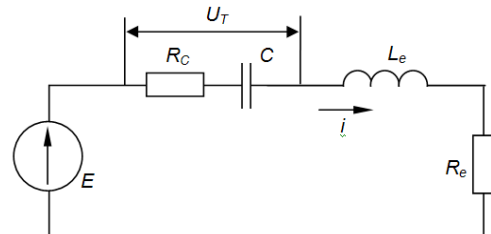


Рис. 7. Схема еквівалентного кола у процесі вимикання тиристора

При цьому нехтуємо опором навантаження, яке значно менше активного опору шунтуючого кола, а також вважаємо, що протягом перехідного процесу напруга мережі не змінюється. Правомірність цих допущень показана в [1].

Після відповідних перетворень (3) з урахуванням $\alpha = \frac{R_c}{2L_e}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL_e}}$, $\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ одержимо

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0, \quad (4)$$

де початковими умовами цього перехідного процесу є значення струму в колі тиристора і швидкості його зростання у момент часу t_n :

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

При захисті тиристорів від комутаційних перенапруг RC-колами перехідний процес в контурі може носити коливальний, аперіодичний або критичний характер залежно від співвідношення параметрів шунтуючого RC-кола. Раніше в літературі [1] розглядався тільки коливальний процес, де швидкість зростання напруги є найбільшою, а параметри RC-кола, що шунтує тиристор, вибиралися такими, щоб не виходити за його межі. Це було пов'язано з незначною здатністю тиристорів попереднього покоління витримувати високу швидкість зростання напруги на них. В даний час масово виробляються тиристори, для яких швидкість зростання напруги не є визначальним параметром, що дозволяє значно розширити діапазон вибору параметрів шунтуючого RC-кола при довільному характері перехідного процесу в колі. У [11] наведена коротка характеристика цих процесів.

У роботі за допомогою ЕОМ в середовищі Mathcad розраховані максимальні значення перенапруг і швидкостей зростання напруг на тиристорах при різних параметрах навантаження і шунтуючого RC-кола. Програма розрахунків наведена у [5]. Аналіз результатів розрахунку показав, що максимальні значення перенапруг і швидкостей їх зростання при фіксованих параметрах захисного RC-кола матимуть місце при відключенні НА граничних струмів з мінімально допустимим $\cos \phi_n = 0,3$. Для ілюстрації цього положення на рис. 8 наведені графічні залежності $\frac{U_{Tmax}}{E} = f(R_c, C)$ і на рис. 9 $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max} = f(R_c, C)$ для тиристора типу Т153-630 при комутації ним струмів 6300 А, з $\cos \phi_n = 0,3$. При цьому було також встановлено, що для вибору прийнятних параметрів захисного RC-кола з малими часовими витратами більш зручно використовувати залежність цих величин у вигляді табличних даних (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Значення $\frac{U_{Tmax}}{E}$ при різних параметрах RC-кола для тиристора Т153-630 ($\cos \phi = 0,3$, струм, що вимикається, 6300 А)

Опір RC, Ом	Ємність C, мкФ									
	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
30	3,89	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
40	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
50	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
60	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70	7,70
70	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98	8,98
80	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27	10,27
90	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55	11,55
100	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84

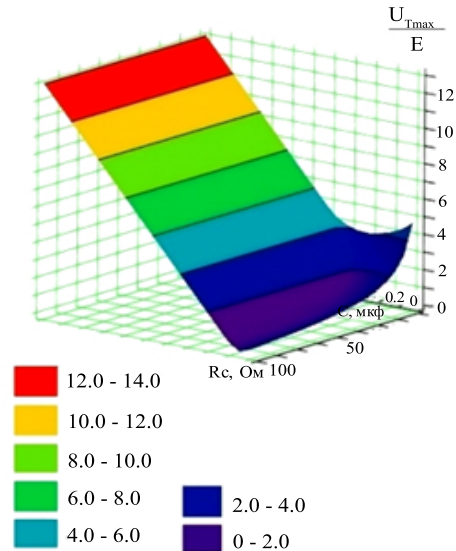


Рис. 8. Графік залежності $\frac{U_{Tmax}}{E}$ від параметрів захисної RC-кола (тиристор типу Т153-630), струм, що вимикається, 6300 А

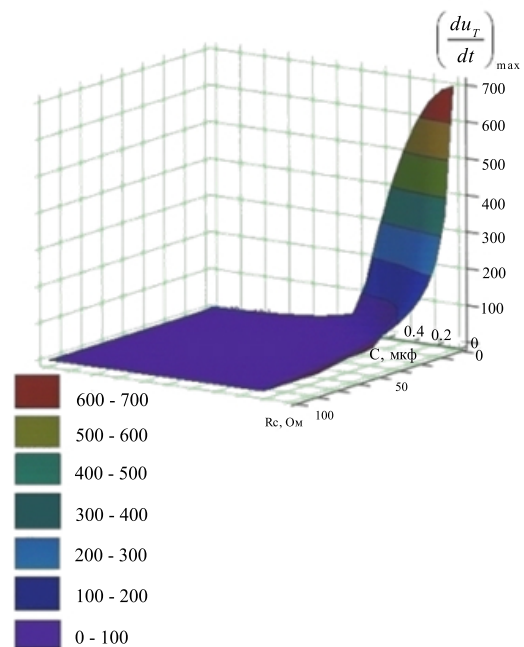


Рис. 9. Графік залежності $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$ на тиристорі від параметрів захисного RC-кола (тиристор типу Т153-630), струм, що вимикається, 6300 А

В табл. 5 наведені розраховані за вище-значеною методикою параметри захисного RC-кола, які забезпечують прийнятний полукратний рівень перенапруг, при використанні найпоширенішого варіанту НК з двома зустрічно-паралельно включеними тиристорами (рис. 3, б) в гібридному контакторі змінного струму, що є найбільш поширеним комутаційним апаратом.

Таблиця 4

Значення $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{\max}$ у В/мкс на тиристорі Т153-630

($\cos \phi = 0,3$, струм, що вимикається, 6300 А) при різних параметрах RC-кола

Опір RC, Ом	Ємність C, мкФ									
	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
30	49,1	3,2	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	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
50	4,7	0,3	0,0	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
70	1,3	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
90	0,3	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

Таблиця 5

Параметри захисного RC-кола для різних значень номінальних струмів контактора ($\cos \phi_H = 0,3$, струм, що комутується – $10I_{\text{ном}}$)

Номінальний струм контактора, А	Тип тиристора та його клас	RC, Ом	C, мкФ	$\frac{U_{T_{\max}}}{E}$	$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{\max}$, 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

З даної табл. 5 виходить, що навіть для цих достатньо високих рівнів перенапруг необхідно застосовувати конденсатори, розраховані на роботу в колах змінного струму з відносно великими ємностями. Як відомо, такі конденсатори мають високу вартість і великі габарити, що поза сумнівом позначається на масогабаритних і вартісних показниках контактора. При цьому бачимо, що рівень максимальних швидкостей зростання перенапруг істотно нижче допустимих рівнів для сучасних тиристорів, для яких цей показник лежить в діапазоні 320–1000 В/мкс.

4. 2. Уточнена методика розрахунку комутаційних перенапруг на напівпровідникових ключах, зашунтованих варисторами і захисними RC-колами, та приклади розрахунку

У зв'язку з вищезазначеним пропонується використовувати додатково із захисним RC-колом ще й нелінійний обмежувач перенапруг (ОПН), у якості якого може бути використаний варистор або зустрічно включені стабілітрони (рис. 10). Це дозволить істотно понизити ємність конденсатора при забезпеченні

прийнятого рівня перенапруг, а також підвищити стійкість схеми до дій зовнішніх перенапруг. У даний час найенергоємнішими є ОПН на основі оксидно-цинкових варисторів (СН2-2, РНС-60) [8].

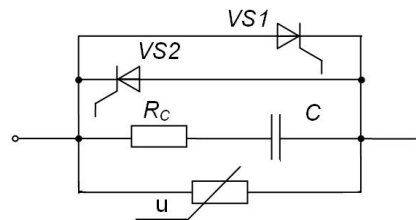


Рис. 10. Варіант захисного RC-кола з варистором

Такі прилади мають високу швидкодію і нелінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ), забезпечують ефективний захист НК від перенапруг на заданому рівні за рахунок поглинання значної частки енергії, накопиченої в індуктивності мережі, яка вимикається. В нашому випадку найбільш доцільно вмикати варистор паралельно захисному RC-колу.

Перевагами варисторного ОПН є: простота схемної реалізації, малі габарити й маса, покращені захисні характеристики (стабільність рівня обмеження перенапруг і протікання струму через ОПН тільки на стадії обмеження перенапруги), низька вартість. Аналіз процесу обмеження перенапруги на НК варисторним ОПН (СН2-2) розглянемо за допомогою еквівалентної розрахункової схеми (рис. 11), яка є модифікацією схеми рис. 10.

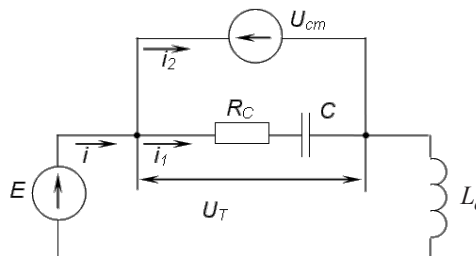


Рис. 11. Еквівалентна розрахункова схема

При розрахунку захисних характеристик варистора СН2-2 звичайно апроксимують його ВАХ ($U_B = f(I)$) з достатньою для інженерних розрахунків точністю (похибка менше 10 %) виразом [11] $U_{cr} = U_{cr}$, де U_{cr} – напруга на варисторі при протіканні струмів, близьких до комутованого (в нашому випадку до I_{RM}).

При цьому U_{cr} варистора вибирається з урахуванням наступних умов [5]:

$$U_{cr} = (1,5 - 2)U_{Фм} k \geq E; U_{Фм} k \leq 0,85U_{кл},$$

де $U_{кл}$ – класифікаційна напруга варистора, дорівнює напрузі на ньому при струмі 1 мА.

Аналіз показує, що при лінійній напрузі мережі $U_{л} = 380$ В ($k = 1,1$) і НК, виконаному за варіантом рис. 3, б, найбільш повно задовольняє поставленим вище умовам варистор СН2-2-470 В.

Перехідний процес в даній розрахунковій схемі при пробі варистора описується наступною системою рівнянь [20]:

$$\begin{cases} L_e \frac{di}{dt} = E - U_{cr}, \\ i_1 R_C + \frac{1}{C} \int i_1 dt = U_{cm}, \\ i = i_1 + i_2, \end{cases}$$

або після перетворень

$$\begin{cases} L_e \frac{di}{dt} = E - U_{cr}, \\ R_C C \frac{di_1}{dt} + i_1 = 0, \\ i = i_1 + i_2. \end{cases} \quad (5)$$

До пробою варистора ($i_2 = 0$) перехідний процес в даній схемі описується рівнянням (3) і всі його розв'язання, наведені раніше, можуть бути використані для розрахунків на цьому етапі.

У зв'язку з цим початкові умови для розв'язання системи рівнянь (5) визначатимуться у момент часу t_0 , при якому напруга на тиристорі $u_T(t)$ досягає напруги U_{cr} , тобто, слід розв'язати рівняння $u_T(t_0) = U_{cr}$.

Нижче як приклад записані початкові умови для коливального процесу [13]:

$$\begin{aligned} i(0) &= i_1(0) = I_0 = \\ &= \left[I_{RM} \cos \omega_{cb} t_0 + \frac{E - R_C I_{RM}}{\omega_{cb} L_e} \left(1 + \frac{\alpha k_1}{\omega_0} \right) \sin \omega_{cb} t_0 \right] e^{-\alpha t_0}, \end{aligned}$$

де t_0 знаходиться з рівняння

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

$$U_c(0) = U_{cr} - I_0 R_C; \quad \frac{di}{dt}(0) = \frac{E - U_{cr}}{L_e}.$$

Аналогічно можна записати початкові умови і для інших видів перехідного процесу.

Після нескладних перетворень одержимо наступне рішення системи (5)

$$i_1 = I_0 e^{-t/\tau}, \quad i_2 = \frac{E - U_{cr}}{L_e} t + I_0 (1 - e^{-t/\tau}),$$

де $\tau = R_C C$.

Максимальне значення струму через варистор I_{2m} визначається з виразу

$$I_{2m} = \frac{E - U_{cr}}{L_e} t_m + I_0 (1 - e^{-t_m/\tau}),$$

де $t_m = \tau \ln \frac{L_e I_0}{(U_{cr} - E)\tau}$ – час, при якому i_2 максимально.

Знаючи величину I_{2m} , є можливість визначити за допомогою ВАХ варистора СН2-2 [8] напругу на ньому $U_{вм}$, яка і буде відповідати максимальній перенапрузі на тиристорі НК, тобто $\frac{U_{Tmax}}{E} = \frac{U_{вм}}{E}$.

Значення $U_{вм}$, також можна визначити, скориставшись наступною аналітичною залежністю, яка з високим ступенем точності апроксимує ВАХ варистора [12]

$$I_{2m} = a U_{вм}^\alpha,$$

де $\alpha = \frac{2,3}{\ln \left(\frac{U_{10}}{U_{кл}} \right)}$ – коефіцієнт нелінійності (U_{10} –

напруга при струмі 10 мА), значення якого для варисторів типу СН2-2 лежить в діапазоні 32–34; a – стала, значення якої залежить від розмірів варистора (для СН2-2 $a = 5 \cdot 10^{-34}$).

Аналіз результатів розрахунку $\frac{du_T}{dt}$ на проміжку часу $(0 - t_0)$, показує, що $\frac{du_T}{dt}$ на цьому відрізку змінюється незначно. Тому найбільш доцільно максимальне значення $\frac{du_T}{dt}$ знаходити на рівні $U_T = U_{cr}$, де дія на тиристор цього фактора максимальна [5].

$$\begin{aligned} \left(\frac{du_T}{dt} \right)_{max} &= (E - R_C I_{RM}) e^{-\alpha t_0} \times \\ &\times \left((2\alpha + \omega_0 k_1) \cos \omega_{cb} t_0 + \frac{\omega_{cb}^2 - \alpha(\alpha + \omega_0 k_1)}{\omega_{cb}} \cdot \sin \omega_{cb} t_0 \right), \end{aligned}$$

при цьому R_C повинне знаходитись в діапазоні

$$0 < R_C < \frac{E}{I_{RM}}.$$

І нарешті, енергія, яка виділяється у варисторі при перенапругах, знаходиться з виразу

$$W = \int_0^{t_1} i_2 U_c dt = \frac{E - U_{cr}}{L_e} U_{cr} \frac{t_1^2}{2} + I_0 U_{cr} (t_1 + \tau e^{-t_1/\tau}),$$

де t_1 – час, коли струм i_2 змінює знак, тобто варистор вимикається, знаходиться з рівняння

$$\frac{E - U_{cr}}{L_e} t_1 + (1 - e^{-t_1/\tau}) I_0 = 0.$$

Результати розрахунків, виконаних на ЕОМ в середовищі Mathcad за допомогою запропонованої вище методики, наведені для гібридних контакторів на різні номінальні струми й номінальну напругу 380 В (виконання НК за варіантом рис. 3, б) в табл. 6. Програма розрахунку наведена у [5]. При цьому розглянутий найгірший випадок, коли контактор комутує граничний струм ($I = 10 I_{ном}$) при $\cos \phi_H = 0,3$.

Аналіз даних, наведених у табл. 6, показує, що застосування захисного варистора дозволяє значно знизити рівень комутаційних перенапруг а також приблизно на порядок знизити ємність конденсатора RC-кола.

Основною перевагою проведених досліджень є те, що в результаті було розроблено уточнені методики розрахунку комутаційних перенапруг на НК комутаційних НА змінного струму, що враховують як варіанти структурної побудови цих апаратів, так і динамічні характеристики СНП. Слід також зазначити, що результати цього дослідження разом з проведеними раніше дослідженнями теплового режиму СНП, що також працюють в НА [10], дозволяють тепер з високою точністю і з невеликими витратами часу вибирати СНП за струмом і за напругою в процесі проектування сучасних комутаційних НА, тобто вирішувати основне завдання цього проектування.

Результати розрахунків параметрів захисного RC-кола із застосуванням варисторів

Номинальний струм контактора, А	Тип тиристора і його клас	Тип варистора	Параметри RC-кола		$\frac{U_{Tmax}}{E}$	$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$, В/мкс	W, Дж
			Rc, Ом	C, мкФ			
160	T161-160-7	CH2-2-470B	22,0	0,05	1,19	217,0	0,301
250	T171-250-7	CH2-2-470B	15,0	0,1	1,18	184,0	0,476
400	T143-400-7	CH2-2-470B	10,0	0,15	1,23	304,0	1,464
630	T153-630-7	CH2-2-470B	5,1	0,22	1,25	320,0	1,757

В даній роботі не наведені порівняльні експериментальні дослідження досліджуваних процесів через надмірне перевантаження статті. За необхідністю результати цих досліджень можуть бути наведені авторами в окремій статті. Слід однак зауважити, що їх результати підтвердили високу точність наведених в даній роботі методик розрахунку.

Наведені в цій роботі результати досліджень можуть застосовуватись для вибору за напругою СНП не тільки при розробці комутаційних, безконтактних і гібридних НА змінного струму, але й при проектуванні пристроїв силової електроніки.

Дані дослідження є продовженням раніше проведених авторами досліджень в цьому напрямку [1, 8].

6. Висновки

1. Отримані узагальнені аналітичні вирази для основних груп СНП, що застосовуються в НА, які з високою точністю характеризують процес зворотного відновлення СНП, що дозволяє реально враховувати динамічні характеристики СНП в процесі комутації навантаження напівпровідниковими апаратами.

2. Розроблені методики розрахунку комутаційних перенапруг та параметрів захисних кіл з урахуванням динамічних характеристик СНП, а також різних варіантів вмикання НК, дозволяють здійснювати зазначені розрахунки з високим рівнем точності. Застосування для розрахунків досить нескладних програм у середовищі Mathcad роблять ці методики доступними для широкого кола фахівців.

3. Показано, що в комутаційних НА змінного струму для захисту їх НК від перенапруг доцільно застосовувати захисне RC-коло з паралельно включеним варистором.

4. Встановлено, що сумісне застосування захисного RC-кола і варистора дозволяє в порівнянні з традиційною схемою захисту зменшити ємність конденсатора вдесятеро, а значить і результуючий струм витoku у відключеному стані апарату, знизити клас тиристорів, які використовуються в комутаційних НА на номінальній напруги 380 В до 7, а також підвищити їхню стійкість до дії зовнішніх перенапруг. Вживання ж малогабаритного і недорогого варистора, що працює в полегшеному режимі, практично не знижує надійність роботи пристрою і його масогабаритні й вартісні показники.

Література

1. Сосков, А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита [Текст]: учебник / А. Г. Сосков, И. А. Соскова. – К. : Каравелла, 2005. – 344 с.
2. Murai, K. Development of PDC and PDU with semiconductor breakers [Text] / K. Murai ; T. Tanaka; T. Babasaki; Y. Nozaki // 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011. – P. 1–8. doi: 10.1109/intelec.2011.6099748
3. Tanaka, Y. Development of semiconductor switches (SiC-BGSIT) applied for DC circuit breakers [Text] / Y. Tanaka, A. Takatsuka, T. Yatsuo, Y. Sato, J. 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
4. Сосков, А. Г. Розрахунок теплового режиму напівпровідникових приладів в умовах роботи у складі напівпровідникових апаратів [Текст] / А. Г. Сосков, М. Л. Глебова, Н. О. Сабалаєва, Я. Б. Форкун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 5, № 8 (71). – С. 58–66. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27983
5. 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.
6. Shukla, A. A Survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies [Text] / A. Shukla, G. D. Demetriades // Power Delivery, IEEE Transactions on IEEE Journals & Magazines. – 2015. – Vol. 30, Issue 2. – P. 627–641. doi: 10.1109/tpwrd.2014.2331696
7. Khalifa, M. Solid-state a.c. circuit breaker [Text] / M. Khalifa, A. Rahman, S. Enamul-Haque // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1979. – Vol. 126, Issue 1. – P. 75–76. doi: 10.1049/piee.1979.0013
8. Сосков, А. Г. Усовершенствованные силовые коммутационные полупроводниковые аппараты низкого напряжения [Текст]: монографія / А. Г. Сосков. – Харьковская национальная академия городского хозяйства, 2011. – 156 с.

9. Abe, S. Malfunction mechanism of semiconductor circuit breaker in HVDC power supply system [Text] / S. Abe, K. Fukushima, Y. Sihun, M. Ogawa, K. Nomura, M. Shoyama, T. Ninomiya, A. Matsumoto, A. Fukui, M. Yamasaki // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010. – P. 3733–3738. doi: 10.1109/ecce.2010.5617785
10. Magnusson, J. On the use of metal oxide varistors as a snubber circuit in solid-state breakers [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
11. Kerboua, H. 1200 V snubberless symmetrical GTO for AC switches [Text] / H. Kerboua, D. Seville, F. Miserey // Power Electronics and Applications. Fifth European Conference on IET Conference Publications. – 1993. – Vol. 2. – P. 272–277.
12. Magnusson, J. Separation of the Energy Absorption and Overvoltage Protection in Solid-State Breakers by the Use of Parallel Varistors [Text] / J. Magnusson, R. Saers, L. Liljestrand, G. Engdahl // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2014. – Vol. 29, Issue 6. – P. 2715–2722. doi: 10.1109/tpe.2013.2272857
13. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]: учебник / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2002. – 640 с.

Досліджено динамічні процеси в системі керування гідропривода конвеєра з паралельно встановленими гідромоторами за допомогою математичної моделі, побудованої з урахуванням фізичних явищ, що відбуваються під час роботи гідросистеми за змінного навантаження. Визначено параметри системи керування, що забезпечують безупинну роботу конвеєра за рахунок вмикання і вимкання додаткового гідромотора в умовах дії перевантажень

Ключові слова: гідропривод, система керування, конвеєр, змінні вантажопотоки, динамічні процеси, математичне моделювання

Исследованы динамические процессы в системе управления гидропривода конвейера с параллельно установленными гидромоторами с помощью математической модели, построенной с учетом физических явлений, происходящих во время работы гидросистемы при переменной нагрузке. Определены параметры системы управления, обеспечивающие непрерывную работу конвейера за счет включения и выключения дополнительного гидромотора в условиях действия перегрузок

Ключевые слова: гидропривод, система управления, конвейер, переменные грузопотоки, динамические процессы, математическое моделирование

УДК 622.64:62-522.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65930

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ГІДРОПРИВОДА СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ІЗ ЗМІННИМИ ВАНТАЖОПОТОКАМИ

Л. К. Поліщук

Кандидат технічних наук, професор*

E-mail: leo.polishchuk@gmail.com

Є. В. Харченко

Доктор технічних наук, професор

Кафедра опору матеріалів

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: Kharchen@wr.pl

О. В. Піонткевич

Аспірант**

E-mail: archimed1989@gmail.com

О. О. Коваль*

Здобувач

E-mail: kovaloleg@outlook.com

*Кафедра металорізальних верстатів та обладнання автоматизованого виробництва***

Кафедра технології та автоматизації машинобудування*

***Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021

1. Вступ

Стрічкові конвеєри широко використовують у різних галузях народного господарства, що сприяє механізації та автоматизації технологічних процесів. Вантажопотоки, що поступають на транспортувальний

орган, характеризуються відносною постійністю чи змінністю як за інтенсивністю так і за періодом завантаження. Наприклад, транспортні вантажопотоки, які формуються у заоб'язках шахт, відрізняються суттєвою нерівномірністю за амплітудою, перервами в надходженні вантажу тощо. Здебільшого, ці зміни носять