

ФОРМУВАННЯ КОМУТАЦІЙНОЇ НАПРУГИ ПРИ ПОТРОЄНІЙ ЧАСТОТІ ІМПУЛЬСІВ КЕРУВАННЯ КЛЮЧАМИ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ

Бойко В. С., д.т.н., проф., Дзигуненко І. О., аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Руденко О. С., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Розвиток силової напівпровідникової техніки і теорії дискретних систем дозволяє створювати високоефективні енергозберігаючі технології перетворення змінного струму для живлення технологічних установок.

У цьому випадку регульований випрямляч по відношенню до енергосистеми виконує роль споживача електроенергії, і його енергетичні показники у цьому випадку будуть впливати на основні характеристики електротехнічного комплексу.

Більшість сучасних потужних перетворювачів електричної енергії є трифазними і основу їх схемної реалізації складає трифазна мостова схема. Перетворювач електроенергії за такою схемою може мати різні варіанти практичної реалізації: може бути некерованим, тобто реалізованим на діодах, може бути частково керованим, коли лише в одній з трифазних груп силових вентилів застосовуються керовані напівпровідникові прилади (комбіноване управління), чи повністю керованим.

Перетворювачі електричної енергії, які дістали назву компенсаційних, у цьому контексті мають ще більше варіантів схемної реалізації, оскільки у своєму складі містять додатковий пристрій для компенсації реактивної потужності. Схема одного з можливих варіантів такого перетворювача з комбінованим управлінням наведена на рис. 1.

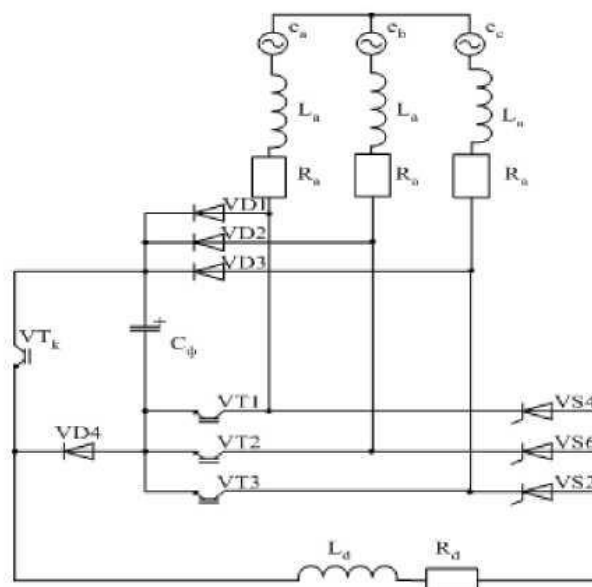


Рисунок 1 – Компенсаційний перетворювач з комбінованим управлінням

У цьому перетворювачі одна його частина (катодна група електричних вентилів) працює з випереджаючими кутами управління, а анодна – в режимі природної комутації (відстаючі кути управління). При послідовному з'єднанні катодної і анодної груп силових вентилів, при відповідному підборі кутів управління, відбувається взаємна компенсація реактивної потужності перетворювача і мережі.

Компенсаційний перетворювач, схема якого наведена на рис. 1, мають тільки один вузол ємнісної комутації в катодній групі. Як зазначають автори розробки [1], оснащення перетворювача конденсаторним фільтром надає йому ряд нових властивостей [2].

Останнє зауваження справедливе для будь-якого компенсаційного перетворювача, оскільки наявність пристрою, здатного суттєво впливати на комутаційний процес, змінює характер електромагнітних процесів у перетворювачі і його енергетичні характеристики.

Мета роботи. Дослідити процес формування комутаційної напруги у трифазному мостовому компенсаційному випрямлячі, який містить комутуючу ланку, що складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів, імпульси керування якими мають потроєну частоту, порівняно з частотою напруги мережі живлення. Зробити висновки щодо доцільності застосування такого способу формування комутуючої напруги досліджуваного перетворювача.

Результати досліджень. Досліджується трифазний мостовий компенсаційний перетворювач з однією групою комутуючих конденсаторів. Технічне рішення, схема якого наведена на рис. 2, захищене патентом України на корисну модель [3].

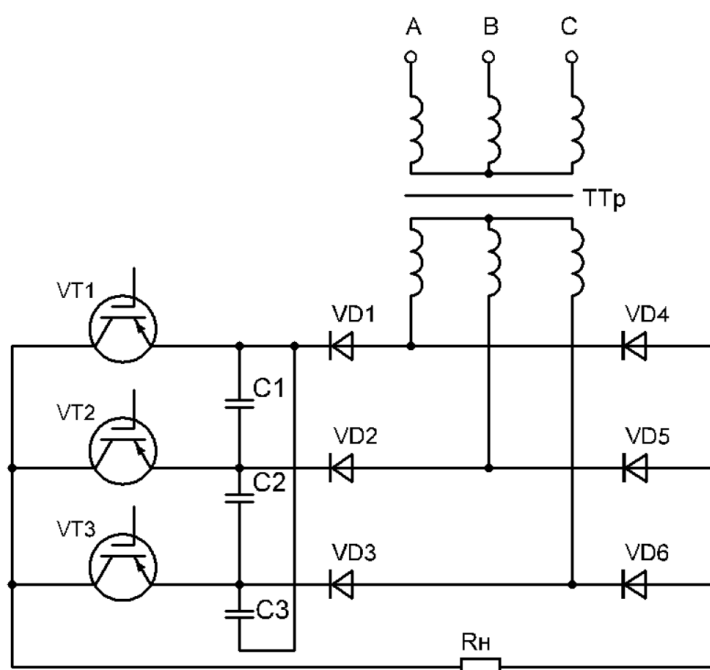


Рисунок 2 – Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача

Зі схеми рис. 2 випливає, що комутуюча ланка перетворювача, яка складається з трифазної конденсаторної батареї (C1, C2, C3) та трифазної групи повністю керованих приладів (наприклад, IGBT - транзисторів VT1, VT2, VT3) підімкнена до діодів катодної групи (VD1, VD2, VD3). Можливе підключення і до діодів анодної групи.

Оскільки транзистори комутуючої ланки є повністю керованими приладами, на них покладається функція перемикання фаз конденсаторної батареї за таким алгоритмом, щоб напруга конденсаторів (комутуюча напруга) за величиною і формою була у змозі забезпечити компенсаційний режим роботи перетворювача.

Результати наукових досліджень, наведені у публікації, отримані за умови, що імпульси керування транзисторами комутуючої ланки мають потроєну частоту, порівняно з частотою мережі живлення, яку вважаємо за основну.

Електромагнітний процес комутації силових електричних вентилів перетворювача, в основному, визначає напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора. У дослідженні вона приймається за синусоїдну, симетричну, прямого чергування фаз. Також нехтується активним і реактивним опором кола змінного струму, а силові електричні вентиля ідеалізуються простими ключами. За цих умов можна вважати, що комутація струму силовими електричними вентилями відбувається миттєво.

Для розуміння динаміки зміни величини і форми комутуючої напруги при зміні моменту включення в роботу транзисторів комутуючої ланки, розглянемо декілька режимів роботи перетворювача. При цьому за початок відліку приймемо момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.

Режим 1. Момент включення в роботу транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1. Оскільки між цими моментами зсуву немає, то розглядуваному режиму відповідає умова $\Delta\psi = 0$, де $\Delta\psi$ - величина зсуву між моментами вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 та транзистора VT1.

Алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки у режимі 1 представлено на рис. 3. Послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів є прямою, тобто вони працюють у послідовності VD1 → VD2 → VD3.

Частота перемикання транзисторів комутуючої ланки – потроєна, а послідовність вступу їх в роботу також є прямою: VT1 → VT2 → VT3.



Рисунок 3 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів у режимі 1

З рис. 3 випливає, що зміна стану досліджуваного перетворювача у режимі 1 відбувається через проміжок $2\pi/9$, тобто крива струму i_C фази конденсаторної батареї матиме на періоді основної частоти 9 інтервалів.

Застосовуючи схему рис. 2 та алгоритм комутації згідно рис. 3, отримаємо, що на першому інтервалі, коли одночасно працюють силовий електричний вентиль VD1 і транзистор комутуючої ланки VT1, струм у фазах конденсаторної батареї відсутній. Через $2\pi/9$ включається в роботу транзистор VT2. На другому інтервалі через фазу конденсаторної батареї С1 проходить дві третини струму навантаження I_d . Через фази С2 і С3 – по одній третій, а з урахуванням напрямку цих струмів, вони є від'ємними.

Криві струму фаз конденсаторної батареї у досліджуваному режимі побудовані на рис. 4. Як бачимо, форма струмів окремих фаз конденсаторної батареї відрізняється.

Знаючи закономірність зміни струму фази конденсаторної батареї на окремих інтервалах періоду, розрахуємо комутуючу напругу, використовуючи співвідношення:

$$u_C = \frac{1}{\omega C} \int_0^g i_C d\vartheta + u_C(0). \quad (1)$$

Кількість інтервалів кривої комутуючої напруги така ж, як і кількість інтервалів кривої струму.

Розрахунок комутуючої напруги фази С1 конденсаторної батареї:

I інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^g i_C d\vartheta + u_C(0) = u_C(0) = u_{C(1)k}.$$

II інтервал: $i_C = 2I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^g \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(1)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(2)k} = \frac{2I_d}{27fC} + u_C(0).$

III інтервал: $i_C = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^g \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(2)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{2I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(3)k} = \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$

IV інтервал: $i_C = -2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(3)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(4)k} = \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$

V інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(4)k} = \frac{I_d}{27fC} + u_C(0) = u_{C(5)k}.$$

VI інтервал: $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(6)k} = u_C(0).$

VII інтервал: $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(6)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(7)k} = -\frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$

VIII інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(7)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(8)k} = u_C(0).$

IX інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(9)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(8)k} = u_C(0) = u_{C(9)k}.$$

Початкове значення кривої комутуючої напруги $u_{C1}(0)$ розрахуємо, виходячи з того, що середнє значення кривої $u_C(\vartheta)$ на періоді дорівнює нулю:

$$u_{C1}(0) = -\frac{2I_d}{81fC}. \quad (2)$$

Розрахунок комутуючої напруги фази С2 конденсаторної батареї:

I інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_C(0) = u_C(0) = u_{C(1)k}.$$

II інтервал: $i_C = -I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(1)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9, \quad u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$

III інтервал: $i_C = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(2)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9, \quad u_{C(3)k} = u_C(0).$

IV інтервал: $i_C = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9, \quad u_{C(4)k} = \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$

V інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(4)k} = \frac{I_d}{27fC} + u_C(0) = u_{C(5)k}.$$

VI інтервал: $i_C = 2I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(5)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9, \quad u_{C(6)k} = \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0)..$

VII інтервал: $i_C = -I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9;$

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(6)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9, \quad u_{C(7)k} = \frac{2I_d}{27fC} + u_C(0).$

VIII інтервал: $i_C = -2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(7)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{2I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(8)k} = u_C(0).$

IX інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(9)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(8)k} = u_C(0) = u_{C(9)k}.$$

Початкове значення кривої комутуючої напруги $u_{C2}(0)$ розрахуємо, виходячи з того, що середнє значення кривої $u_C(\vartheta)$ на періоді дорівнює нулю:

$$u_{C2}(0) = -\frac{2I_d}{81fC}. \quad (3)$$

Розрахунок комутуючої напруги фази С3 конденсаторної батареї:

I інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_C(0) = u_C(0) = u_{C(1)k}.$$

II інтервал: $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(1)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$

III інтервал: $i_C = -2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(2)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi / 9, \quad u_{C(3)k} = -\frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$

IV інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 9;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(4)k} = -\frac{2I_d}{27fC} + u_C(0)$.

V інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$;

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(4)k} = -\frac{2I_d}{27fC} + u_C(0) = u_{C(5)k}.$$

VI інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$;

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{2I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(6)k} = -\frac{3I_d}{27fC} + u_C(0)$.

VII інтервал: $i_C = 2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$;

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(6)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{3I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(7)k} = -\frac{I_d}{27fC} + u_C(0)$.

VIII інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$;

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(7)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{27fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = 2\pi/9$, $u_{C(8)k} = u_C(0)$.

IX інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$;

$$u_{C(9)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(8)k} = u_C(0) = u_{C(9)k}.$$

Початкове значення кривої комутуючої напруги $u_{C3}(0)$ розрахуємо, виходячи з того, що середнє значення кривої $u_C(\vartheta)$ на періоді дорівнює нулю:

$$u_{C3}(0) = \frac{4I_d}{81fC}. \quad (4)$$

Маючи початкове значення кривої комутуючої напруги для фаз конденсаторної батареї, розрахуємо закономірність зміни напруги $u_C(\vartheta)$ окремих її фаз. Результати розрахунку занесемо до таблиці.

Таблиця

№ Інт.	Протяжність інтервалу	Напруга $u_c(\vartheta)$ С1	Напруга $u_c(\vartheta)$ С2	Напруга $u_c(\vartheta)$ С3
	1	2	3	4
1	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$-\frac{2I_d}{81fC}$	$-\frac{2I_d}{81fC}$	$\frac{4I_d}{81fC}$
2	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$\frac{2I_d}{3\omega C}g - \frac{2I_d}{81fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{2I_d}{81fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g + \frac{4I_d}{81fC}$
3	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$\frac{I_d}{3\omega C}g + \frac{4I_d}{81fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{5I_d}{81fC}$	$-\frac{2I_d}{3\omega C}g + \frac{I_d}{81fC}$
4	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$-\frac{2I_d}{3\omega C}g + \frac{7I_d}{81fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{2I_d}{81fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{5I_d}{81fC}$
Продовження таблиці 1				
	1	2	3	4
5	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$\frac{I_d}{81fC}$	$\frac{I_d}{81fC}$	$-\frac{2I_d}{81fC}$
6	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g + \frac{I_d}{81fC}$	$\frac{2I_d}{3\omega C}g + \frac{I_d}{81fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{2I_d}{81fC}$
7	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{2I_d}{81fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}g + \frac{7I_d}{81fC}$	$\frac{2I_d}{3\omega C}g - \frac{5I_d}{81fC}$
8	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$\frac{I_d}{3\omega C}g - \frac{5I_d}{81fC}$	$-\frac{2I_d}{3\omega C}g + \frac{4I_d}{81fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C}g + \frac{I_d}{81fC}$
9	$0 \leq \vartheta \leq 2\pi/9$	$-\frac{2I_d}{81fC}$	$-\frac{2I_d}{81fC}$	$\frac{4I_d}{81fC}$

За наведеними у таблиці виразами на рис. 4 побудовані криві комутуючої напруги. Як бачимо має місце несиметрії напруг по фазах, що є небажаним для електромагнітного процесу перетворювача. Несиметрія комутуючих напруг призводить до неоднакових випереджаючих кутів регулювання силових електричних вентилів окремих фаз, а, відповідно, і до несиметрії струмів фаз перетворювального трансформатора.

Режим 2. Між моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 та включенням транзистора VT1 має місце зсув за фазою $\Delta\psi = 2\pi/9$. Алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів наведено на рис. 5.

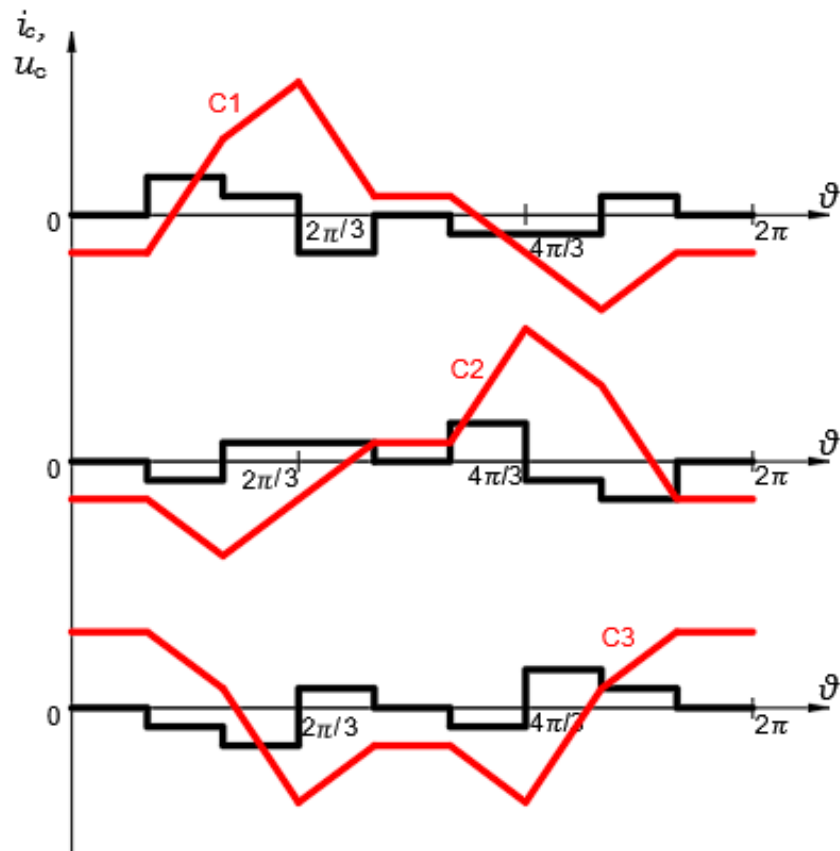


Рисунок 4 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї у режимі 1

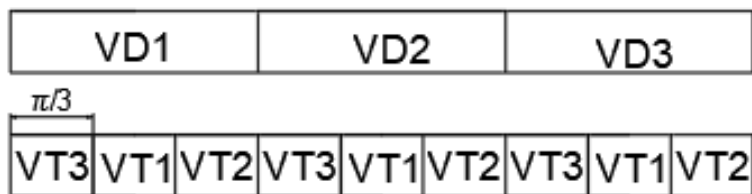


Рисунок 5 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів у режимі 1

Як і у попередньому режимі здійснено побудову (див. рис. 6) кривих струмів фаз конденсаторної батареї. Бачимо, що і у цьому режимі вони несиметричні. Користуючись тією ж методикою, що і раніше, за співвідношенням (1) розрахуємо комутуючу напругу фаз конденсаторної батареї на окремих інтервалах. За результатами розрахунку криві комутуючої напруги фаз конденсаторної батареї побудовані на рис. 6. Зрозуміло, що вони також є несиметричними.

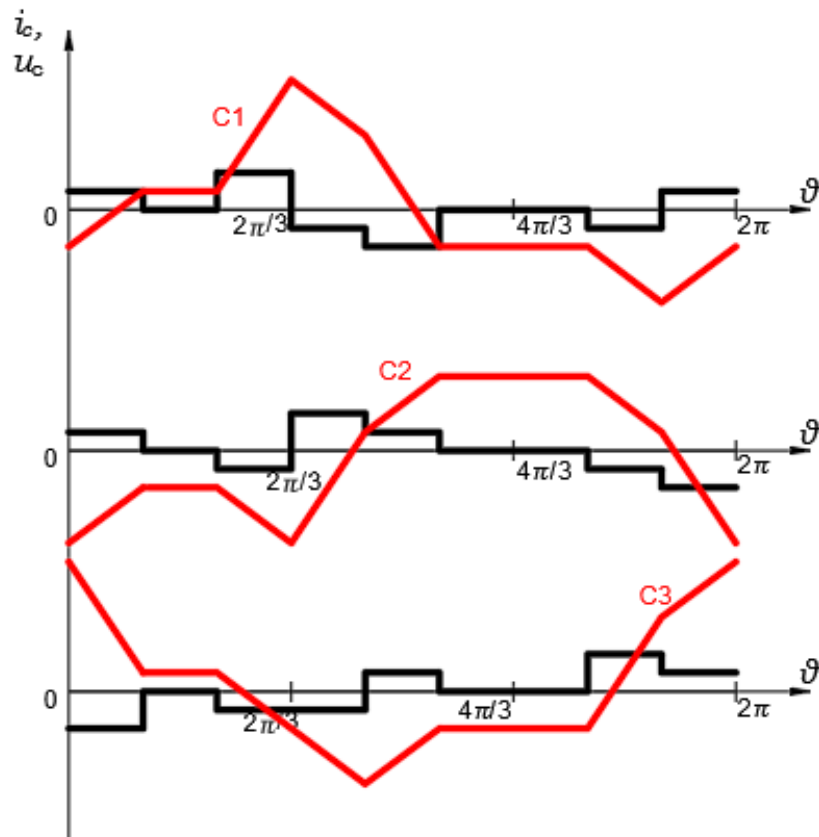


Рисунок 6 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї у режимі 2

Для верифікації результатів проведених досліджень, здійснено схемотехнічне моделювання режиму 2 трифазного мостового компенсаційного перетворювача. Його результати представлені на рис. 7-9.

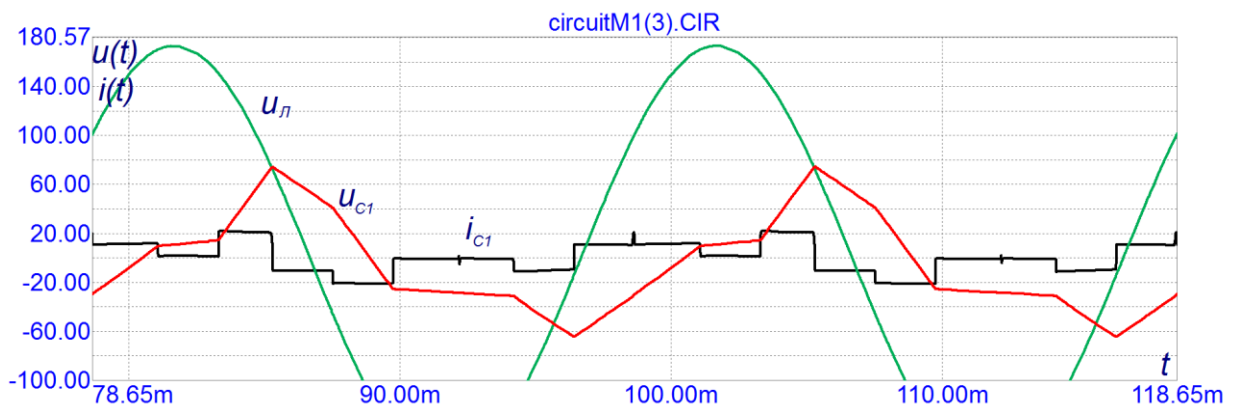


Рисунок 7 – Струм і напруга фази C1 конденсаторної батареї у режимі 2

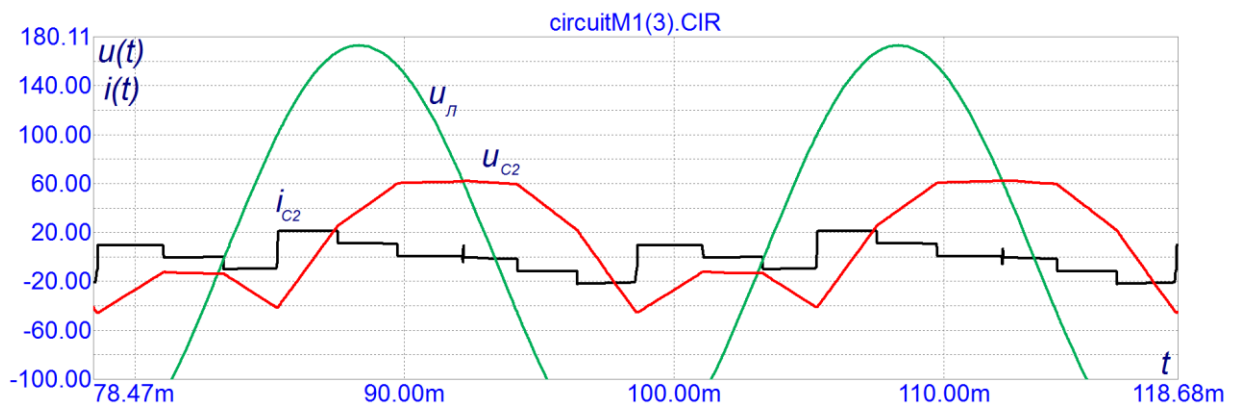


Рисунок 8 – Струм і напруга фази C2 конденсаторної батареї у режимі 2

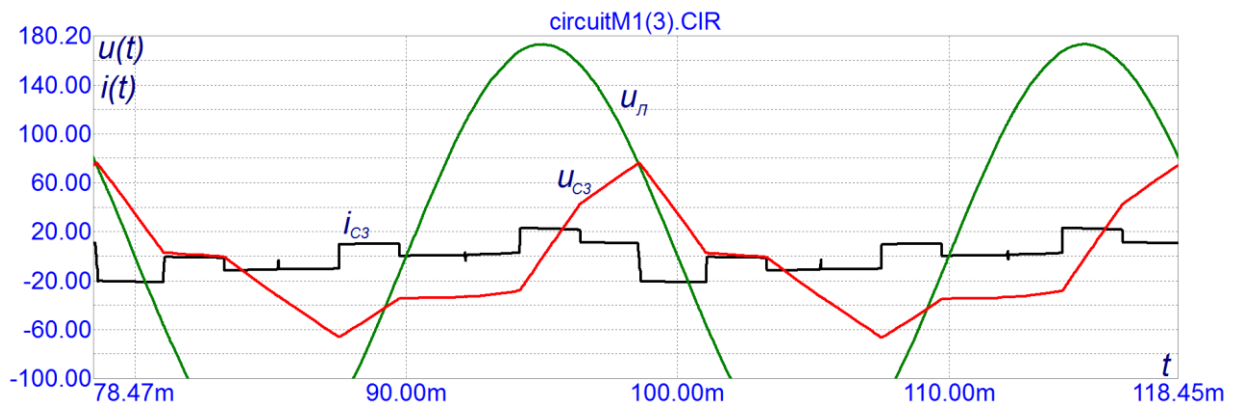


Рисунок 9 – Струм і напруга фази C3 конденсаторної батареї у режимі 2

Порівнюючи криві комутуючої напруги окремих фаз конденсаторної батареї, отримані за результатами схемотехнічного моделювання, з теоретичними кривими (рис. 5), є підстави для висновку щодо достовірності результатів проведеного наукового дослідження.

Авторами також проведено дослідження формування комутуючої напруги у режимі 3, коли зсув між моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 та включенням транзистора VT1 складає $\Delta\psi = 4\pi/9$. Докладно результати цього дослідження у публікації не представлені, але вони відображені на сімействах кривих комутуючої напруги окремих фаз конденсаторної батареї (рис. 10), які показують динаміку зміни величини і форми цієї напруги, залежно від величини зсуву $\Delta\psi$.

З наведених кривих випливає, що при різній величині зсуву ($\Delta\psi$) між моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 та включенням транзистора VT1 напруга двох фаз має різну форму, але однакове максимальне значення. Напруга третьої фази відрізняються від двох інших як за формою, так і за величиною. Вона менша.

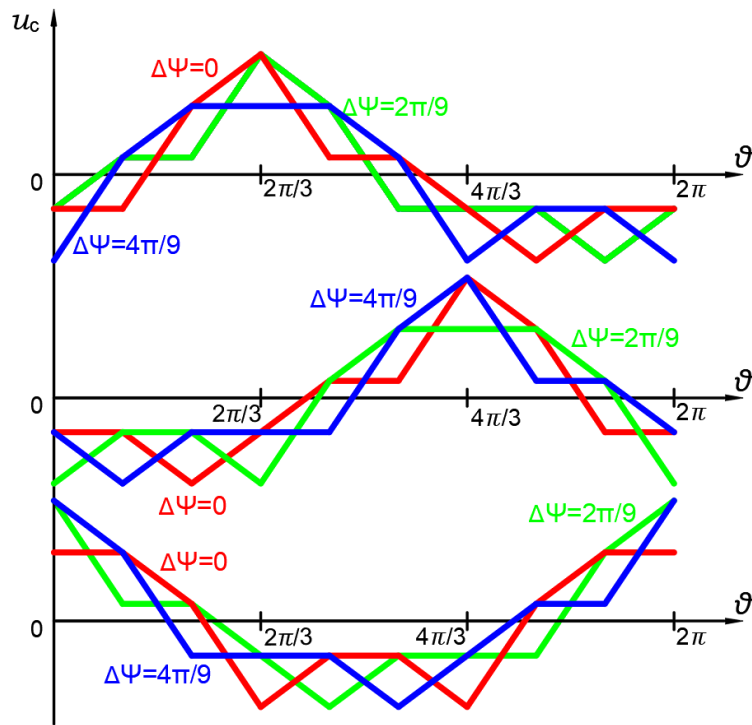


Рисунок 10 – Динаміка зміни величини і форми комутуючої напруги фаз конденсаторної батареї

Висновки. 1. Силві електричні вентиля компенсаційної частини досліджуваного перетворювача вступають в роботу у момент, коли комутуюча напруга фази конденсаторів, яка знаходиться у контурі комутації, досягає максимального значення. Тож, з кривих комутуючої напруги рис. 7-9 та рис. 10 впливає, що силві електричні вентиля двох фаз матимуть однаковий випереджаючий кут керування, а третьої – інший, менший за величиною.

2. Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач здатний працювати при потроєній частоті імпульсів керування ключами комутуючої ланки, але режим його роботи буде несиметричним, що не бажано з погляду на технічні та енергетичні показники його роботи.

3. Мають сенс наукові дослідження інших умов перезаряду конденсаторів комутуючої ланки.

Перелік посилань

1. Патент РФ на корисну модель "Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности": Патент RU 78018 U1, МПК H02M 7/48 / Зайцев А.И., Плехов А.С - у 2008 121537/22. Заявл. 27.05.2008. Опубл. 10.11.2008, Бюл. № 31.

2. Зайцев А. И. Энергосберегающая технология преобразования переменного тока в постоянный ток / А.И. Зайцев. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2007. – №2. – С. 60–65.

3. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02B 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.