

ФОРМУВАННЯ КОМУТАЦІЙНОЇ НАПРУГИ ПРИ ПОДВОЄНІЙ ЧАСТОТІ ІМПУЛЬСІВ КЕРУВАННЯ КЛЮЧАМИ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шкардун О.В., аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Гуцул О.О., студент

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

Вступ. Застосування компенсаційних випрямлячів для живлення потужних технологічних споживачів постійного струму має давню історію. Їх розробка і дослідження велися у багатьох вищих навчальних закладах та науково-дослідних інститутах національних академій наук бувшого СРСР. Розробки різних наукових колективів мали свою специфіку, тобто відрізнялися схемотехнічними рішеннями та досягнутим економічним ефектом.

Важливе значення для розвитку пристроїв енергетичної електроніки загалом, як і для розвитку одного з її напрямів, який отримав назву «компенсаційні перетворювачі», має наявність елементної бази, яка дозволяє вирішити технічні питання щодо реалізації таких пристроїв. Основу сучасних потужних перетворювачів електричної енергії складає трифазна мостова схема. При усіх її перевагах, вона має і недоліки. Основними з них є низький коефіцієнт потужності при діодній реалізації через наявність некомпенсованої реактивної потужності електромагнітного процесу комутації і також низький коефіцієнт потужності при тиристорній реалізації за рахунок наявності некомпенсованої реактивної потужності електромагнітного процесу комутації та неактивної потужності зсуву.

Розробка нового покоління компенсаційних перетворювачів, яка ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», передбачає застосування повністю керованих приладів з метою перезаряду конденсаторів комутуючої ланки.

До речі, таким шляхом ідуть і інші науковці, які займаються створенням і дослідженням компенсаційних перетворювачів. Як приклад, на рис. 1 наведена схема компенсаційного перетворювача, розробленого у РФ докт. техн. наук Зайцевим О.І. [1].

Даний перетворювач містить групу силових повністю керованих вентилів (типів GTO, IGCT або IGBT) VT1, VT2, VT3, групу допоміжних малопотужних діодів VD1, VD2, VD3, полярний конденсатор фільтра C_{ϕ} , комутуючий вентиль VT7 і розділяючий діод VD7. Для того, щоб конденсатор почав розряджатися струмом фази, яка вступає в роботу, необхідно подати керуючий імпульс на включення силового вентиля цієї фази і одночасно на вентиль VT7.

Переключення конденсатора в коло фази, що виходить з роботи, з метою його заряду, здійснюється шляхом виключення силового вентиля в цій фазі і одночасно вентиля VT7. На позамутаційних інтервалах конденсатор

виявляється поза контуром струму навантаження, не впливаючи на протікання процесів у перетворювачі.

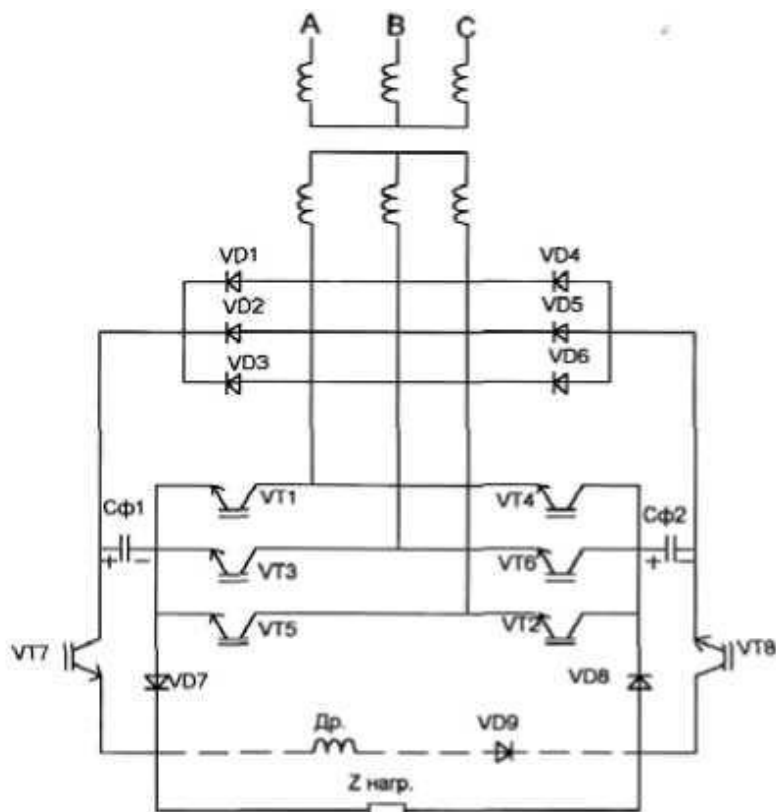


Рисунок 1 – Схема компенсаційного перетворювача

Економічність передачі електроенергії від джерела до навантаження залежить від типу і технічних характеристик елементів споживача, а також від режимів роботи випрямного пристрою. Електричний перетворювач перетворює змінні, які характеризують режим його роботи на вході, до виду, необхідного для подальшого перетворення у навантаженні [2].

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 подвоєну 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].

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.

Трифазна група повністю керованих приладів виконує роль комутатора конденсаторів комутуючої ланки. Перемикання транзисторів за певним алгоритмом дозволяє створювати напругу конденсаторів (комутуючу напругу) такої форми і величини, яка здатна забезпечити компенсаційний режим роботи перетворювача. При цьому основними характеристиками процесу перезаряду конденсаторів є частота імпульсів керування повністю керованих приладів, протяжність імпульсів та їх зсув відносно моменту вступу в роботу силових електричних вентилів.

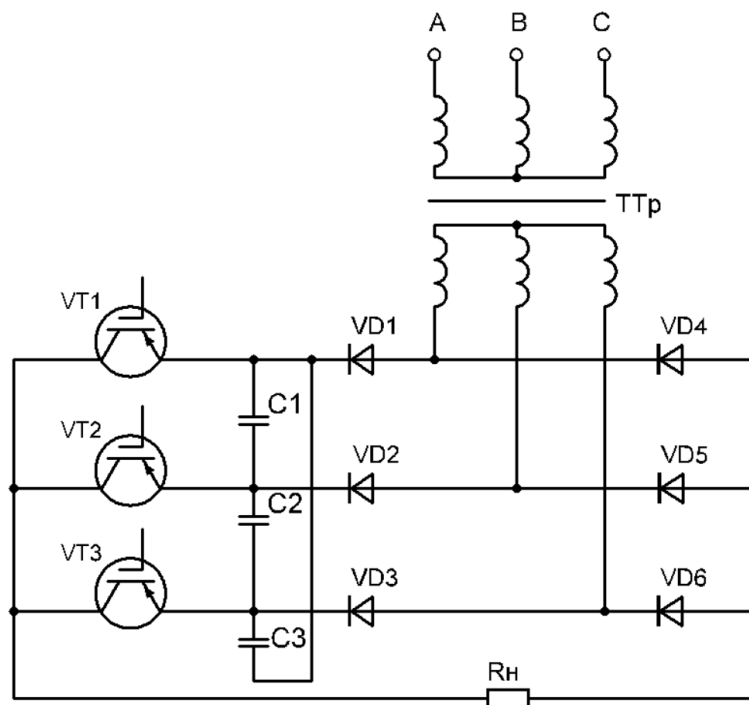


Рисунок 2 – Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача

У дослідженні, результати якого представлені даною публікацією, розглядаються особливості перезаряду конденсаторів комутуючої ланки за умови, що частота імпульсів керування транзисторами удвічі більша за основну частоту, тобто частоту напруги мережі живлення. Звідси випливає, що кожний транзистор включається в роботу двічі на періоді основної частоти, а його протяжність складає одну шосту частину цього періоду. Зазначені характеристики системи керування протягом усього дослідження залишаються незмінними. Змінюється лише величина зсуву моменту вступу в роботу транзисторів відносно силових електричних вентилів.

У дослідженні за початок відліку прийнято момент вступу в роботу силового вентиля VD1. Разом з тим нехтується величиною активного і індуктивного опорів кола змінного струму перетворювача, що дозволяє вважати комутацію струму силовими електричними вентилями миттєвою. Також приймається, що трифазна система напруг вторинної обмотки перетворювального трансформатора є симетричною прямого чергування фаз.

Для того, щоб зрозуміти динаміку зміни величини і форми комутуючої напруги залежно від зсуву імпульсів керування транзисторів відносно початку вступу в роботу вентиля VD1, розглянемо декілька режимів.

Режим 1. Момент включення в роботу транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1. Якщо через $\Delta\psi$ позначити величину зсуву між цими моментами, то виходить, що досліджуваному режиму відповідає умова $\Delta\psi = 0$. Алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки представлено на рис. 3. Звернімо увагу, що послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів визначається трифазною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Оскільки, як зазначалося раніше, ця напруга має пряме чергування фаз, силові електричні вентиля працюють у послідовності VD1→VD2→VD3.

Частота перемикавання транзисторів комутуючої ланки – подвоєна. Тож відповідно до чергування гармонік різних порядків, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки має бути зворотною: VT1→VT3→VT2.

VD1			VD2			VD3		
VT1	VT3	VT2	VT1	VT3	VT2	VT1	VT3	VT2

Рисунок 3 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів у режимі 1

Використовуючи схему рис. 2 та наведений вище алгоритм комутації, розраховуємо криві струму фаз конденсаторної батареї. Як впливає з рис. 3, зміна стану досліджуваної системи відбувається через шосту частину періоду ($\pi/3$). На першому інтервалі, коли працюють силовий електричний вентиль VD1 і транзистор VT1, струм через фази конденсаторної батареї не проходить.

Після включення в роботу транзистора VT3 через фазу C1 конденсаторної батареї проходить третина випрямленого струму перетворювача I_d . Такий же струм проходить і через фазу C2 конденсаторної батареї. Через фазу C3 проходить дві третини випрямленого струму перетворювача, причому його напрям протилежний до того, який у дослідження прийняти за додатний.

Результати такого аналізу протягом періоду основної частоти наведені у таблиці 1 (колонка струм C1), а криві струму усіх фаз, відповідно до отриманого результату, побудовані на рис. 4. Як бачимо, струми фаз конденсаторної батареї однакові за формою і величиною, та мають зсув за фазою на третину періоду основної частоти, як і у будь-якій трифазній системі прямого чергування фаз.

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

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

Таблиця 1

№ Інт.	Протяжність інтервалу	Струм C1	Напруга $u_C(\vartheta)$ C1	Напруга $u_C(\vartheta)$ C2	Напруга $u_C(\vartheta)$ C3
1	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	0	$-\frac{I_d}{18fC}$	$\frac{I_d}{18fC}$
2	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC}$
3	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	$\frac{I_d}{18fC}$	0	$-\frac{I_d}{18fC}$
4	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$-\frac{2I_d}{3}$	$-\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC}$
5	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	$-\frac{I_d}{18fC}$	$\frac{I_d}{18fC}$	0
6	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC}$	$\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta$

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

I інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

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

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

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/3, \quad u_{C(2)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$

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

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(2)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(3)k}.$$

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

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(3)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/3$, $u_{C(4)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0)$.

V інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/3$;

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(4)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(5)k}.$$

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

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(5)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/3$, $u_{C(6)k} = u_C(0)$.

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

$$u_C(0) = 0. \quad (2)$$

Ураховуючи останнє, отримаємо остаточні вирази закономірності зміни комутуючої напруги на окремих інтервалах періоду і занесемо їх у табл. 1. Криві комутуючої напруги фаз конденсаторної батареї при $\Delta\psi = 0$, побудовані на рис. 4, разом із кривими струму.

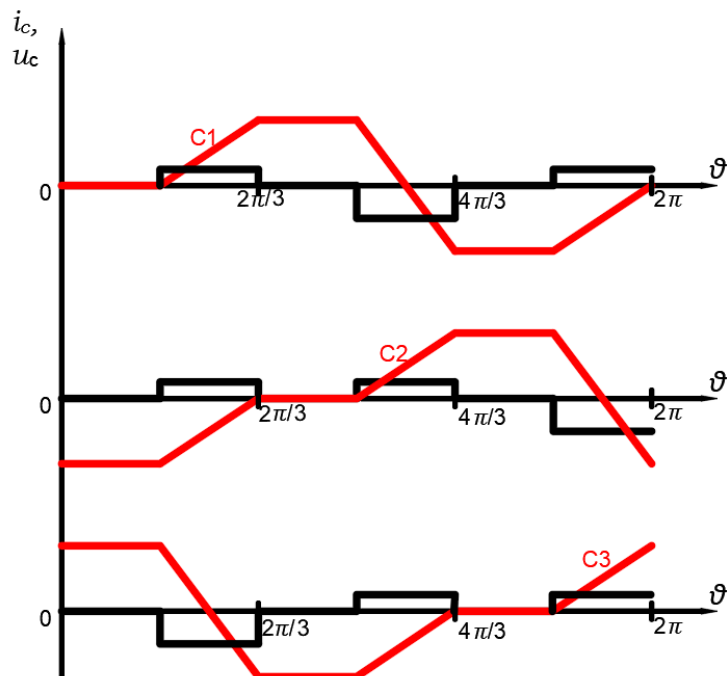


Рисунок 4 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї у режимі 1

Режим 2. Момент включення в роботу транзистора VT1 збігається з серединою робочого інтервалу силового електричного вентиля VD1, що

відповідає умові $\Delta\psi = \pi/3$. Алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки представлено на рис. 5.

VD1			VD2			VD3		
VT2	VT1	VT3	VT2	VT1	VT3	VT2	VT1	VT3

Рисунок 5 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів у режимі 2

Використовуючи схему рис. 2 та наведений вище алгоритм комутації, розраховуємо криву струму фази конденсаторної батареї C1. Як впливає з рис. 5, зміна стану досліджуваної системи, як і у режимі 1, відбувається через шосту частину періоду ($\pi/3$). На першому інтервалі, коли працюють силовий електричний вентиль VD1 і транзистор VT2, через фазу конденсаторної батареї C1 проходить струм, який дорівнює двом третім випрямленого струму I_d перетворювача.

На другому інтервалі, коли працюють силовий електричний вентиль VD1 і транзистор VT1, струм через фази конденсаторної батареї не проходить.

Результати аналізу величини струму фази C1 конденсаторної батареї на усіх інтервалах періоду наведено у табл. 2. Крива струму, відповідно до отриманого результату, побудована на рис. 6.

Використовуючи ці дані та співвідношення (1), розрахуємо закономірність зміни комутуючої напруги на окремих інтервалах періоду.

Таблиця 2

№ Інт.	Протяжність інтервалу	Струм C1	Напруга $u_c(\vartheta)$ C1	Напруга $u_c(\vartheta)$ C2	Напруга $u_c(\vartheta)$ C3
1	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$\frac{2I_d}{3}$	$\frac{2I_d}{3\omega C}\vartheta - \frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta + \frac{I_d}{18fC}$
2	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	$\frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{I_d}{18fC}$	0
3	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$-\frac{I_d}{3}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta + \frac{I_d}{18fC}$	$\frac{2I_d}{3\omega C}\vartheta - \frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta$
4	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	0	$\frac{I_d}{18fC}$	$-\frac{I_d}{18fC}$
5	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	$-\frac{I_d}{3}$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta$	$-\frac{I_d}{3\omega C}\vartheta + \frac{I_d}{18fC}$	$\frac{2I_d}{3\omega C}\vartheta - \frac{I_d}{18fC}$
6	$0 \leq \vartheta \leq \pi/3$	0	$-\frac{I_d}{18fC}$	0	$\frac{I_d}{18fC}$

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

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

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{C(1)k} = \frac{I_d}{9fC} + u_C(0).$

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

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(1)k} = \frac{I_d}{9fC} + u_C(0) = u_{C(2)k}$$

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

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{9fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{C(3)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$

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

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(4)k}.$$

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

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(4)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{C(5)k} = u_C(0).$

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

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(5)k} = u_C(0) = u_{C(6)k}.$$

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

$$u_C(0) = -\frac{I_d}{18fC}. \quad (3)$$

Ураховуючи останнє, отримаємо остаточні вирази закономірності зміни комутуючої напруги на окремих інтервалах періоду і занесемо їх у табл. 2. Крива комутуючої напруги фази С1 конденсаторної батареї при $\Delta\psi = \pi/3$, побудована на рис. 6, разом із кривою струму цієї фази.

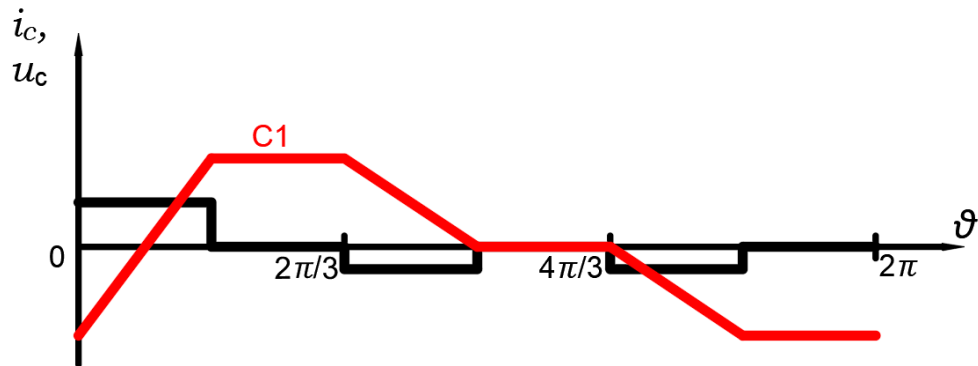


Рисунок 6 – Струм і напруга фази C1 конденсаторної батареї у режимі 2

Режим 3. Момент включення в роботу транзистора VT1 збігається з кінцем робочого інтервалу силового електричного вентиля VD1 чи моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD2. Це відповідає умові $\Delta\psi = 2\pi/3$. Алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки у цьому режимі представлено на рис. 7.

VD1		VD2		VD3	
VT3	VT2	VT1	VT3	VT2	VT1

Рисунок 7 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів у режимі 3

Використовуючи ту ж саму методику дослідження, що і на попередніх режимах, отримаємо закономірності зміни струму фаз конденсаторної батареї на окремих інтервалах періоду. На першому інтервалі, коли разом із силовим електричним вентилям VD1 працює транзистор VT3, через фазу конденсаторної батареї C1 проходить струм, який дорівнює третині випрямленого струму I_d перетворювача.

Не наводячи докладного аналізу процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки у режимі 3, відмітимо, що його особливістю є те, що на періоді немає проміжків, які б характеризувалися відсутністю струму.

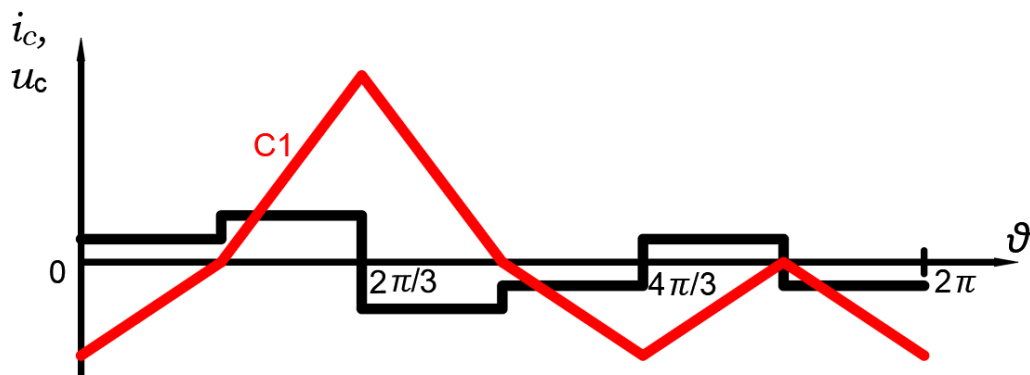


Рисунок 8 – Струм і напруга фази C1 конденсаторної батареї у режимі 3

На основі теоретичного дослідження умов перезаряду комутуючих конденсаторів у різних режимах роботи перетворювача, на рис. 9 побудоване сімейство кривих $u_c(\vartheta)$. З нього можна зробити висновки щодо динаміки зміни комутуючої напруги у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі, залежно від зсуву між моментом вступу в роботу силових електричних вентилів та транзисторів комутуючої ланки.

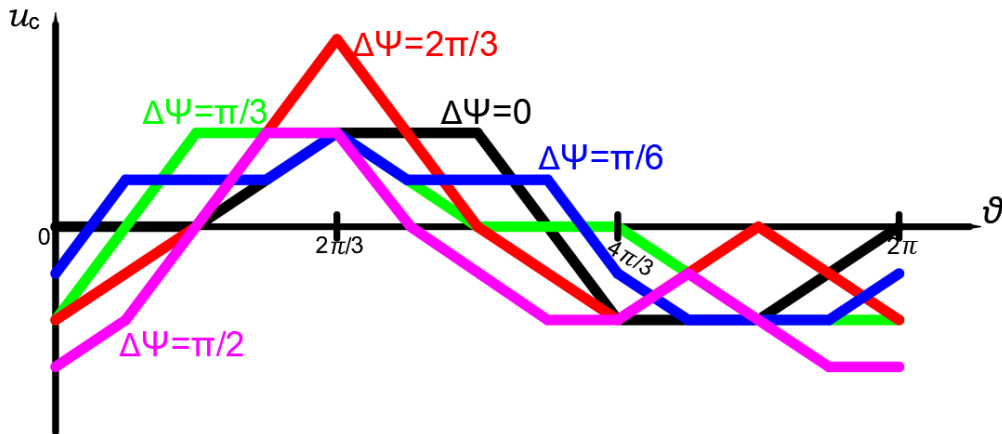


Рисунок 9 – Динаміка зміни комутуючої напруги трифазного мостового компенсаційного перетворювача при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами ланки комутації

Для підтвердження результатів теоретичного аналізу досліджуваного у роботі процесу перезаряду комутуючих конденсаторів, здійснено схемотехнічне моделювання роботи перетворювача у режимах 1 та 2.

Рис. 10 ілюструє початок робочого режиму керування транзисторами комутуючої ланки (режим 1). На ньому зображений період кривих лінійної напруги перетворювального трансформатора $u_{\text{л}}$ та струму і напруги фази C1 комутуючих конденсаторів.

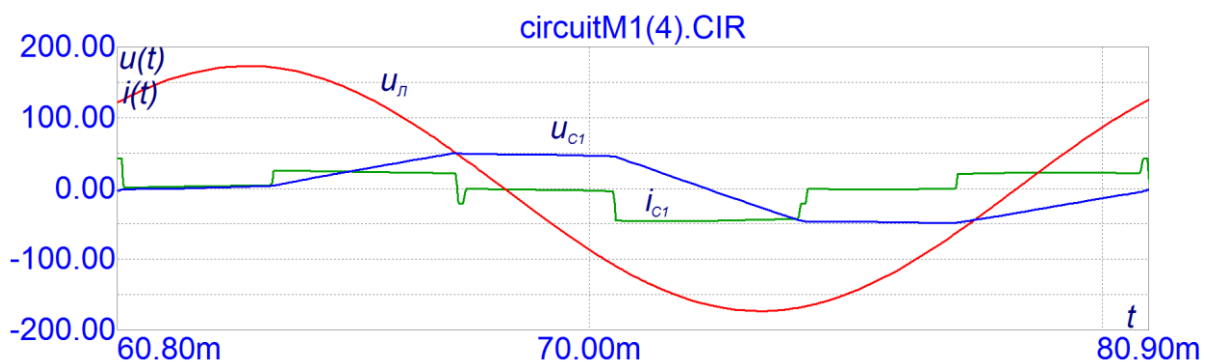


Рисунок 10 – Моделювання роботи перетворювача у режимі 1

Якщо з'являється зсув між моментом вступу в роботу діодів і транзисторів, це призводить до зміни величини і форми комутуючої напруги. Результати

моделювання роботи досліджуваного перетворювача у режимі 2 наведені на рис. 11.

Наведені на двох останніх рисунках криві свідчать про повний збіг результатів теоретичного та схемотехнічного моделювання.

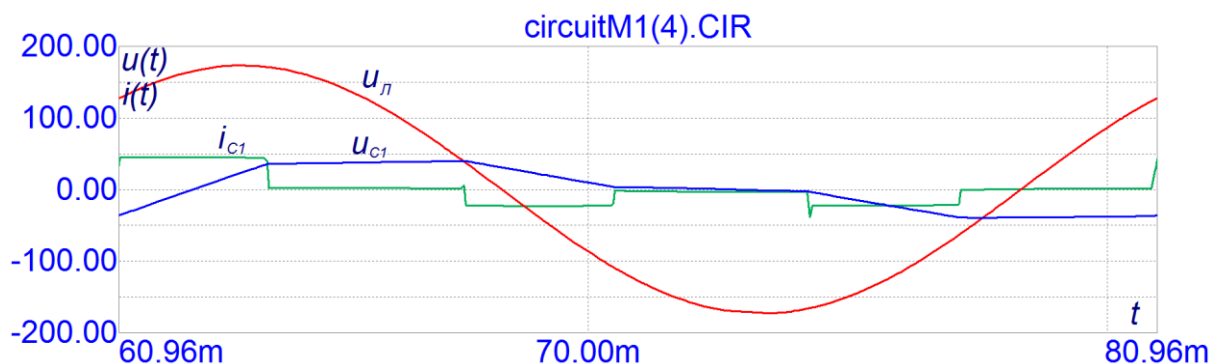


Рисунок 11 – Моделювання роботи перетворювача у режимі 2

Висновки. 1. Проведені дослідження підтверджують факт залежності режиму роботи перетворювача від умов перезаряду конденсаторної батареї, які створюються сукупністю факторів, основними з них є зсув за фазою між моментом вступу в роботу діодів компенсаційної частини перетворювача і транзисторів, протяжність роботи останніх, частота імпульсів керування транзисторами.

2. Збільшення куту зсуву між моментами вступу в роботу силових електричних вентилів і включення транзисторів комутуючої ланки призводить до зміни форми і величини комутуючої напруги. Її найбільше значення досягається у режимі 3 при $\Delta\psi = 2\pi/3$.

3. У роботі досліджується вплив лише одного із зазначених факторів у декількох режимах роботи перетворювача. Останнє свідчить про широку перспективу подальших наукових досліджень електромагнітних процесів у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі.

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 H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.