

РОЗДІЛ 8. ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ЗАЛЕЖНІСТЬ КОНДЕНСАТОРНОЇ НАПРУГИ ВІД ЧАСТОТИ ПЕРЕМИКАННЯ КЛЮЧІВ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шкардун О.В., аспірант, Клочков І.О., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Робота є продовженням публікації результатів дослідження електромагнітних процесів у новому поколінні компенсаційних перетворювачів, створення яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Такі перетворювачі у своєму складі містять комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT). Керування останніми за певним алгоритмом дозволяє формувати напругу конденсаторів (комутуючу напругу) такої величини і форми, при якій забезпечуються високі енергетичні характеристики перетворення електричної енергії.

Як свідчать наукові публікації [1, 2, 3], таким шляхом ідуть і інші науковці, які займаються створенням і дослідженням перетворювачів компенсаційного типу.

У публікації [4] наведені результати дослідження процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки, якщо імпульси керування повністю керованими приладами мають подвоєну частоту, порівняно з частотою напруги мережі живлення. Узагальнено результати дослідження, тобто інформація щодо величини і форми комутуючої напруги за зазначених умов, представлені на рис. 1.

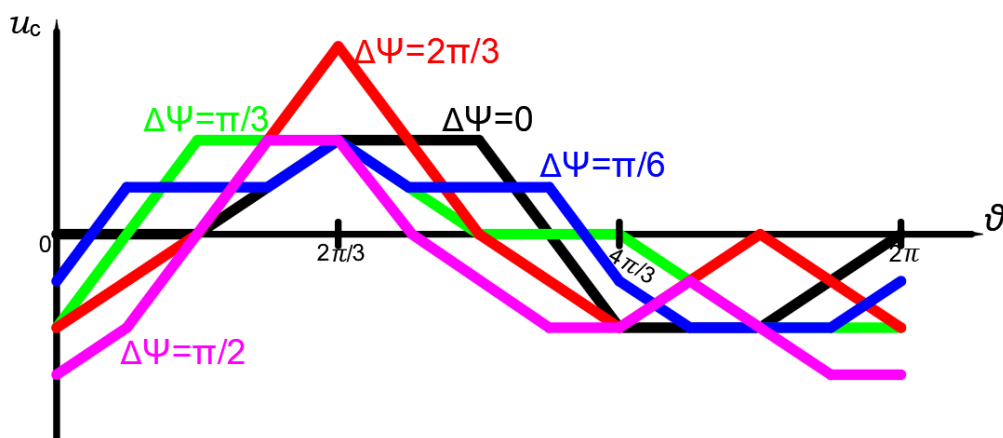


Рисунок 1 - Динаміка зміни комутуючої напруги трифазного мостового компенсаційного перетворювача при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами ланки комутації

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. Підтверджена також можливість роботи компенсаційного перетворювача при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами ланки комутації.

Результати дослідження процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки при потроєній частоті імпульсів керування транзисторами ланки комутації наведені у [5]. Узагальнено результати дослідження представлені на рис. 2.

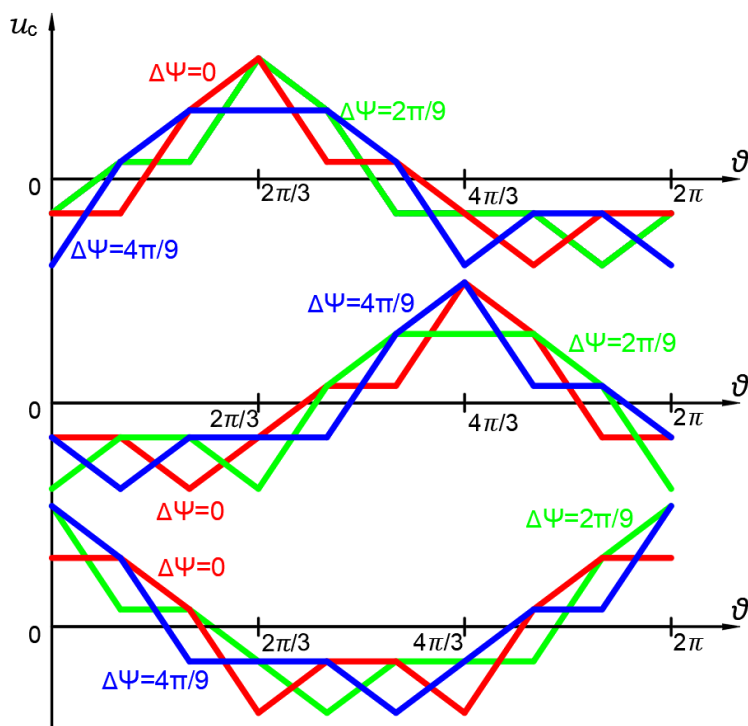


Рисунок 2 - Динаміка зміни величини і форми комутуючої напруги фаз конденсаторної батареї

Звернімо увагу, що на відміну від попереднього режиму, результати дослідження представлені для окремих фаз. Це пояснюється тим, що форма і величина комутуючої напруги по фазам відрізняється. З цього випливають два висновки. По-перше, такий режим перезаряду не може бути рекомендований для практичного застосування. По-друге, потрібно провести дослідження інших режимів перезаряду конденсаторів комутуючої ланки.

Мета роботи. Дослідити процес формування комутаційної напруги у трифазному мостовому компенсаційному випрямлячі (схема, рис. 3), який містить комутуючу ланку, що складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів, імпульси керування якими мають підвищену 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. 3, захищене патентом України на корисну модель [6].

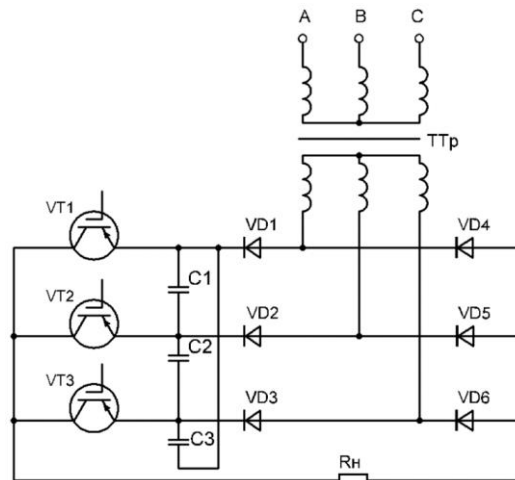


Рисунок 3 - Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача

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 частоти імпульсів керування транзисторів, розглянемо чотирикрану, восьмикратну та тридцятидвократну частоту імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Чотирикратна частота. 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. 2.19.

Звернімо увагу, що послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів визначається трифазною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Оскільки ця напруга має пряме чергування фаз, силові електричні вентиля працюють у послідовності VD1 → VD2 → VD3.

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

VD1	VD2	VD3
-----	-----	-----

T1	T2	T3	V	T1	V	T2	V	T3	V	T1	V	T2	V	T3	V	T1	V	T2	V	T3	V	T1	V	T2	V	T3	V
----	----	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---

Рисунок 4 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів при чотирикратній частоті імпульсів керування

Використовуючи схему рис. 3 та наведений вище алгоритм комутації, розрахуємо криві струму фаз конденсаторної батареї. Як впливає з рис. 4, зміна стану досліджуваної системи відбувається через дванадцятину періоду ($\pi/6$).

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

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0). \quad (1)$$

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

Розрахунок комутуючої напруги фази С1 конденсаторної батареї:

I інтервал: $i_c = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

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

II інтервал: $i_c = 2I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6, u_{c(2)k} = \frac{2I_d}{36fC} + u_c(0)$.

III інтервал: $i_c = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{c(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{c(2)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{2I_d}{36fC} + u_c(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6, u_{c(3)k} = \frac{3I_d}{36fC} + u_c(0)$.

IV інтервал: $i_c = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{c(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{c(3)k} = \frac{3I_d}{36fC} + u_c(0) = u_{c(4)k}.$$

V інтервал: $i_c = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{c(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{c(4)k} = \frac{3I_d}{36fC} + u_c(0) = u_{c(5)k}.$$

VI інтервал: $i_c = -I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C(6)k} = \frac{2I_d}{36fC} + u_C(0)$.

VII інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(6)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{2I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C(7)k} = u_C(0)$.

VIII інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(7)k} = u_C(0) = u_{C(8)k}.$$

IX інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

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

X інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(10)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(9)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C(10)k} = -\frac{I_d}{36fC} + u_C(0)$.

XI інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(11)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(10)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C(11)k} = u_C(0)$.

XII інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C(12)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(11)k} = u_C(0) = u_{C(12)k}.$$

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

$$u_{C1}(0) = -\frac{I_d}{36fC}. \quad (2)$$

Результати аналізу, криві струму усіх фаз, побудовані на рис. 5.

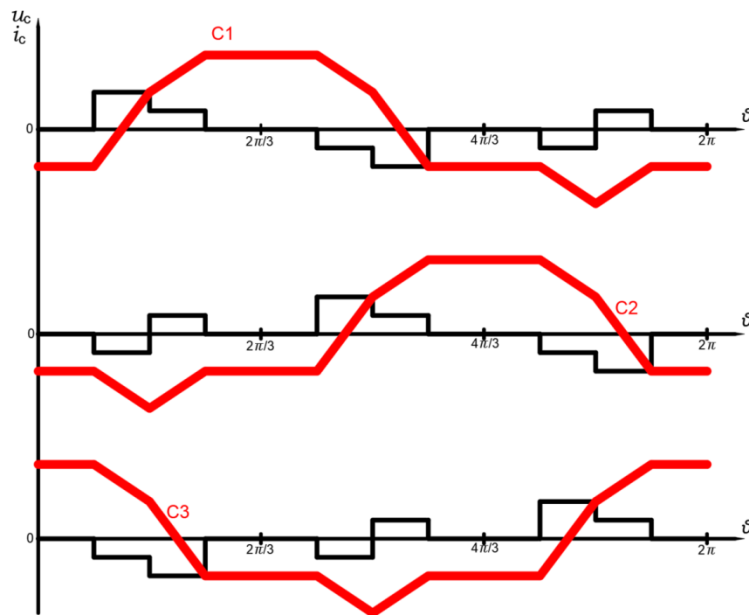


Рисунок 5 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї при чотирикратній частоті імпульсів керування

Восьмикратна частота. 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. 6.

Послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів визначається трифазною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Оскільки ця напруга має пряме чергування фаз, силові електричні вентиля працюють у послідовності VD1 → VD2 → VD3.

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

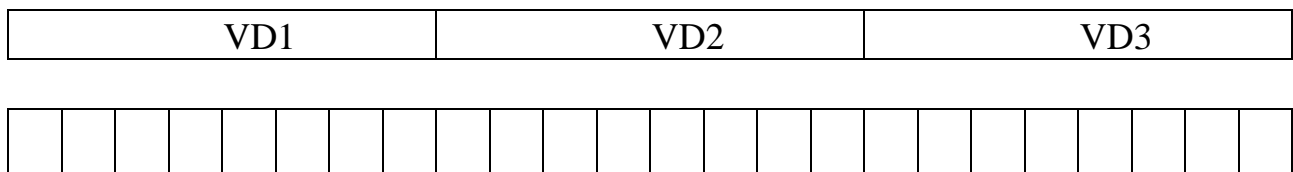


Рисунок 6 – Алгоритм комутації діодів і транзисторів при восьмикратній частоті імпульсів керування

Використовуючи схему рис. 3 та наведений вище алгоритм комутації, розраховуємо криві струму фаз конденсаторної батареї. Як впливає з рис. 6, зміна стану досліджуваної системи відбувається через двадцять четверту частину періоду ($\pi/12$).

Знаючи закономірність зміни струму фази конденсаторної батареї на окремих інтервалах періоду, розрахуємо комутуючу напругу, використовуючи співвідношення (1).

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

Розрахунок комутуючої напруги фази С1 конденсаторної батареї:

I інтервал: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12, u_{C(1)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0)$.

II інтервал: $i_C = 2I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(1)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12, u_{C(2)k} = \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0)$.

III інтервал: $i_C = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(2)k} = \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0) = u_{C(3)k}.$$

IV інтервал: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12, u_{C(4)k} = \frac{4I_d}{72fC} + u_C(0)$.

V інтервал: $i_C = 2I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(4)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{4I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12, u_{C(5)k} = \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0)$.

VI інтервал: $i_C = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(5)k} = \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0) = u_{C(6)k}.$$

VII інтервал: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(6)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12, u_{C(7)k} = \frac{7I_d}{72fC} + u_C(0)$.

VIII інтервал: $i_C = 2I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(7)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{7I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(8)k} = \frac{9I_d}{72fC} + u_C(0)$.

IX інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(9)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(8)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{9I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(9)k} = \frac{7I_d}{72fC} + u_C(0)$.

X інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(10)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(9)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{7I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(10)k} = \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XI інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(11)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(10)k} = \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0) = u_{C(11)k}.$$

XII інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(12)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(11)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{6I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(12)k} = \frac{4I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XIII інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(13)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(12)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{4I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(13)k} = \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XIV інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(14)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(13)k} = \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0) = u_{C(14)k}.$$

XV інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(15)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(14)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(15)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XVI інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(16)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(15)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(16)k} = u_C(0)$.

XVII інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(17)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(16)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(17)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XVIII інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(18)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(17)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(18)k} = u_C(0)$.

XIX інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(19)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(18)k} = u_C(0) = u_{C(19)k}.$$

XX інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(20)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(19)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(20)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XXI інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(21)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(20)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(21)k} = u_C(0)$.

XXII інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(22)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(21)k} = u_C(0) = u_{C(22)k}.$$

XXIII інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(23)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(22)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(23)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0)$.

XXIV інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/12$;

$$u_{C(24)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(23)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/12$, $u_{C(24)k} = u_C(0)$.

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

$$u_{C1}(0) = -\frac{3I_d}{72fC}. \quad (3)$$

Результати аналізу, криві струму усіх фаз, побудовані на рис. 7.

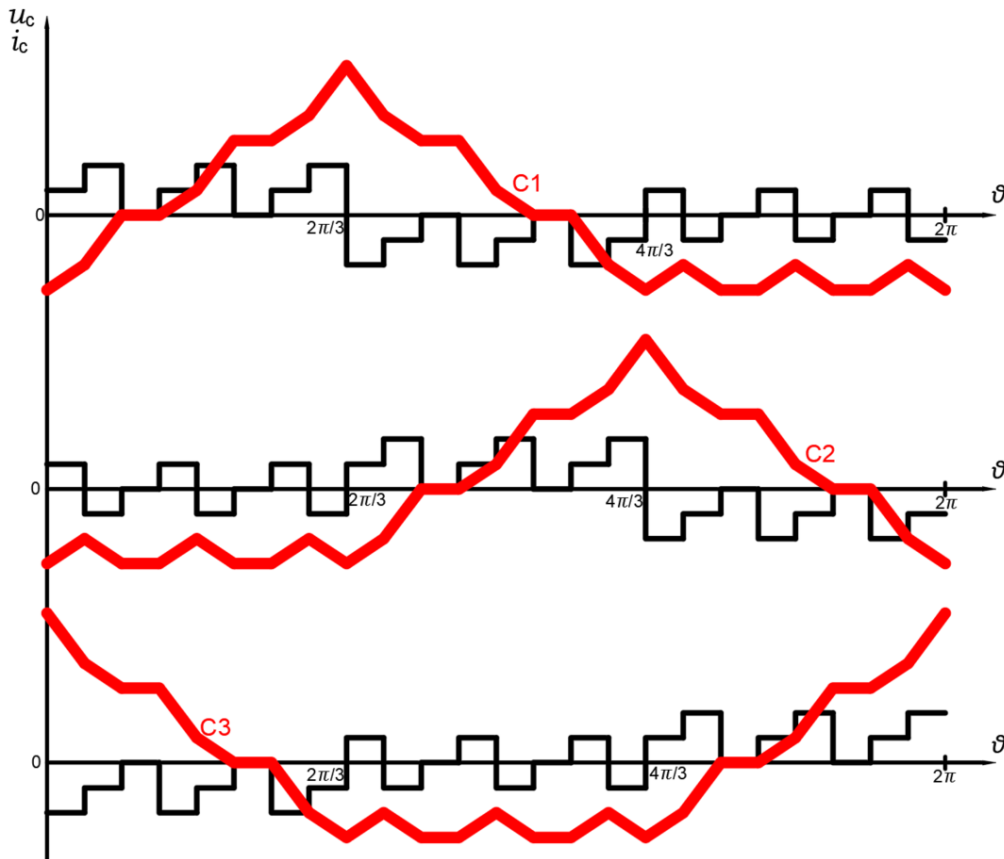


Рисунок 7 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї при восьмикратній частоті імпульсів керування

Тридцятидвократна частота. 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. 2.25.

Послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів визначається трифазною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Оскільки ця напруга має пряме чергування фаз, силові електричні вентиля працюють у послідовності VD1 → VD2 → VD3.

Частота перемикання транзисторів комутуючої ланки – тридцятидвократна. Тож відповідно до чергування гармонік різних порядків, послідовність вступу в

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{3I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(4)k} = \frac{4I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XXI інтервал: $i_C = I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(31)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(30)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{30I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(4)k} = \frac{31I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XXII інтервал: $i_C = 2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(32)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(31)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{31I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(32)k} = \frac{33I_d}{288fC} + u_C(0)$

XXIII інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(33)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(32)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{33I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(33)k} = \frac{31I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XXIV інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(34)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(33)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{31I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(34)k} = \frac{30I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XXV інтервал: $i_C = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(35)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(34)k} = \frac{30I_d}{288fC} + u_C(0) = u_{C(35)k}.$$

XXVI інтервал: $i_C = -2I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(36)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(35)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{30I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(36)k} = \frac{28I_d}{288fC} + u_C(0)$.

LXIV інтервал: $i_C = -I_d/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(64)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(63)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48$, $u_{C(64)k} = u_C(0)$

LXV інтервал: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(65)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(64)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48, u_{C(65)k} = \frac{I_d}{288fC} + u_C(0)$.

LXVI інтервал: $i_C = -I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(66)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(65)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48, u_{C(66)k} = u_C(0)$.

LXVII інтервал: $i_C = 0, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(67)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(66)k} = u_C(0) = u_{C(67)k}.$$

LXVIII: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(68)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(67)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48, u_{C(68)k} = \frac{I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XCIV інтервал: $i_C = I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(95)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(96)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48, u_{C(95)k} = \frac{I_d}{288fC} + u_C(0)$.

XCVI інтервал: $i_C = -I_d/3, 0 \leq \vartheta \leq \pi/48$;

$$u_{C(96)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(95)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{288fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/48, u_{C(96)k} = u_C(0)$.

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

$$u_{C1}(0) = -\frac{11I_d}{288fC}. \quad (4)$$

Результати аналізу, криві струму усіх фаз, побудовані на рис. 9.

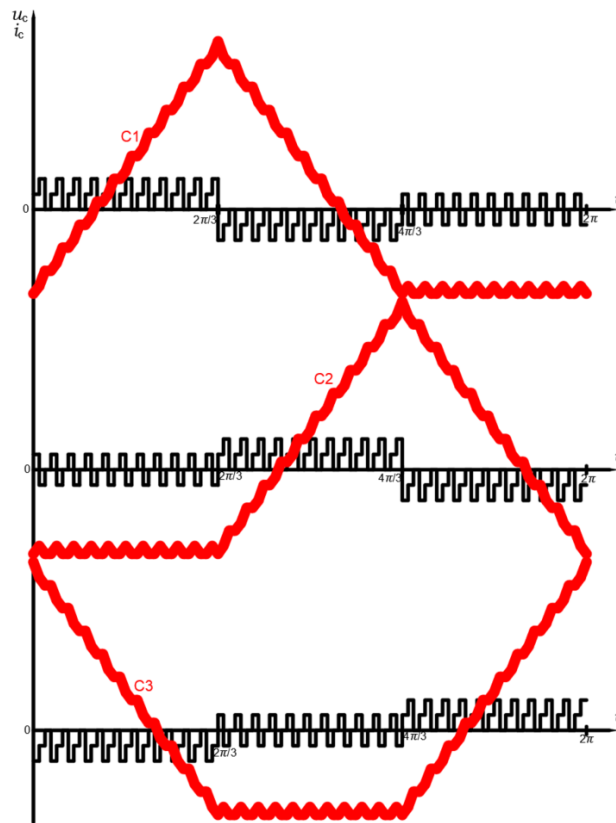


Рисунок 9 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї при тридцятидвократній частоті імпульсів керування

З отриманих результатів виконаємо накладання всіх чотирьох графіків напруги для конденсаторної батареї C1, на рис. 10.

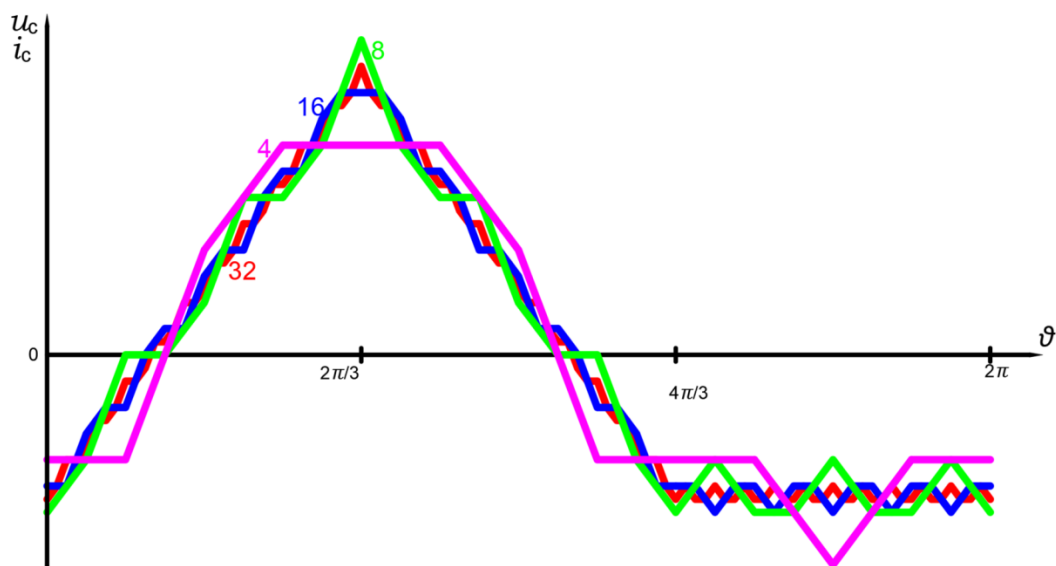


Рисунок 10 – Напруга фази конденсаторної батареї C1 при чотирикраній, восьмикратній, шістнадцятикратній та тридцятидвократній частоті

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 та частота імпульсів керування останніми.

2. При збільшенні частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, крива комутуючої напруги стає більш плавною за рахунок зменшення протяжності інтервалів перезаряду конденсаторів.

3. За усіх однакових умов, при дво- і чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами, максимальне значення комутуючої напруги є найменшим.

4. Найбільшим є максимальне значення комутуючої напруги при восьмикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Воно є у 1.5 рази більшим від величини комутуючої напруги за умови меншої частоти керування транзисторами.

5. При подальшому (порівняно з восьмикратним) збільшенні частоти керування транзисторами максимальне значення комутуючої напруги зменшується. Але це зменшення не може бути більшим за 11% від найбільшого значення комутуючої напруги при восьмикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Тож за зазначеним показником найбільш ефективним є режим перезаряду конденсаторів комутуючої ланки при восьмикратній частоті імпульсів керування транзисторами.

Перелік посилань

1. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.

2. MULTILEVEL VOLTAGE SOURCE CONVERTER. Patent No.: US 8,879,291 B2: H02M 7/217, H02M 7/797// David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB), Prior Publication Data US 2012/006961.0 A1 Mar. 22, 2012, Date of Pat.: Nov. 4, 2014.

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

4. Бойко В.С. Формування комутаційної напруги при подвоєній частоті імпульсів керування ключами комутуючої ланки/ В. С. Бойко, О.В. Шкардун, О.О. Гуцул // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. - Київ: НТУУ "КПІ". - 2021. - с. 511-522.

5. Бойко В.С. Формування комутаційної напруги при потроєній частоті імпульсів керування ключами комутуючої ланки/ В. С. Бойко, І.О. Дзигуненко, О.С. Руденко // Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. - Київ: НТУУ "КПІ". - 2021. - с. 523-535.

6. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - и 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.