

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

## MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.314.1

DOI 10.20535/1813-5420.3.2024.314522

В.С. Бойко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, ORCID 0000-0003-1018-0642

О.В. Шкардун<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0000-0001-7980-8114

Б.В. Линдюк<sup>1</sup>, студент, ORCID 0009-0006-6343-6292

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ЗАЛЕЖНІСТЬ НАПРУГИ НА СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕНТИЛЯХ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВІД ЧАСТОТИ ПЕРЕМИКАНЬ ТРАНЗИСТОРІВ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ

*Дослідженнями перетворювачів електричної енергії компенсаційного типу, проведеними як авторами публікації, так і іншими науковцями, показують, що їх енергетичні характеристики і умови роботи силового обладнання залежать від комутуючої напруги. Досліджуваний трифазний мостовий компенсаційний перетворювач містить одну комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів. Останні є комутатором конденсаторної батареї, виконуючи функції перемикання конденсаторів таким чином, щоб забезпечити енергетичний процес перетворювача, при якому його реактивна енергія компенсується, чи генерується, у разі необхідності. При цьому змінюються і умови роботи силового обладнання перетворювача. Основним змістом дослідження є аналіз складових зворотної напруги силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача та динаміки її зміни, при підвищеній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Це потрібно при визначенні класу вентилів, у разі впровадження перетворювача за досліджуваною схемою у виробництво. Питання класу вентилів розглядається у контексті енергетичних можливостей перетворювача при регулюванні режиму його роботи згідно вимог технологічного процесу. В результаті отримані співвідношення для розрахунку максимального миттєвого значення зворотної напруги силових електричних вентилів у різних режимах роботи перетворювача. Узагальнений висновок показує, що на силових електричних вентилях компенсаційної частини перетворювача зворотна напруга не перевищує напругу на інших вентилях. Бібл. 11, рис. 12.*

**Ключові слова:** конденсаторна батарея, комутатор, комутуюча напруга, електричний вентиль.

#### Вступ.

Досліджуваний трифазний мостовий компенсаційний перетворювач (схема, рис. 1) містить дві трифазні групи силових електричних вентилів. Одна з них, на схемі – анодна, працює у звичайному (некомпенсаційному) режимі. Умови роботи вентилів цієї групи, як і сам комутаційний процес, нічим не відрізняються від умов роботи вентилів трифазного мостового перетворювача за схемою Ларіонова, яка досить ґрунтовно досліджена.

Стосовно величини і форми напруги на силових електричних вентилях цієї схеми, у технічній літературі відмічається, що у проміжку часу, коли через вентиль проходить струм, напруга на ньому дорівнює прямому спаду напруги. Ця напруга значно менша тієї напруги, яка прикладена до вентиля у непровідну частину періоду. Тому нею можна знехтувати.

У непровідну частину періоду напруга на силових електричних вентилях створюється двома лінійними напругами вторинної обмотки перетворювального трансформатора, зміщених між собою за фазою на 60°. Якщо знехтувати протяжністю комутаційного процесу, то зворотна напруга на вентилях буде створюватися лише складовими зазначених напруг. Якщо протяжність комутаційного процесу урахувати, то на зазначені вище складові зворотної напруги накладуться напруги комутаційні.

Принадно звернімо увагу, що це не те ж саме, що і комутуюча напруга. Остання створюється складовими струму навантаження, що проходять через конденсатори комутуючої ланки. Досліджуваний трифазний мостовий компенсаційний перетворювач містить одну комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів.

У дослідженні прийнято, що перетворювач підімкнений до стандартної симетричної трифазної системи прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi/6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi/2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi/6 + \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $E_m$  - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора;  $\vartheta$  – поточна змінна;  $\psi$  – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Струм комутації вентилів анодної групи досліджуваного перетворювача змінюється відповідно до виразу  $i_k = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_\gamma} (1 - \cos \vartheta)$ . Такій закономірності зміни струму комутації відповідає комутаційна напруга

$u_x = x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} = 0.5\sqrt{3}E_m \sin \vartheta$ , або її нормований вираз  $u_{x*} = 0.5 \sin \vartheta$ . За формою ця напруга близька до трикутної, а її найбільше значення приходить на кінець процесу комутації при  $\vartheta = \gamma$ :  $u_{x*\max} = 0.5 \sin \gamma$ .

Трифазна група силових електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача працюють у компенсаційному режимі. Вони забезпечують перетворювачу енергоефективний режим енергозабезпечення технологічних споживачів постійного струму. Зазначений енергетичний режим досягається за рахунок комплектації перетворювача комутуючою ланкою. Таке технічне рішення захищене патентом України на корисну модель [1].

Виходячи із закономірності зміни струму комутації вентилів катодної частини перетворювача [3], нормований вираз комутаційної напруги запишеться так:

$$u_{x*} = \frac{1}{2(\omega_{0*}^2 - 1)} [-\sin(\vartheta - \alpha) + \omega_{0*} \cos \alpha \cdot \sin \omega_{0*} \vartheta - \sin \alpha \cdot \cos \omega_{0*} \vartheta].$$

Як показує аналіз, ця напруга фактично є частиною синусоїдної функції із частотою  $\omega_{0*}$  в межах протяжності комутаційного процесу. Тому форма цієї напруги відрізняється від трикутної.

Викладене ілюструє рис. 2. У фазній напрузі присутні чотири комутаційні «піки», тобто чотири комутаційні напруги, положення і протяжність яких відповідають інтервалу комутації струму силовими електричними вентилями анодної і катодної частин перетворювача.

Комутація струму силовими електричними вентилями катодної частини (компенсаційної) перетворювача відбувається в межах додатної напівхвилі фазної напруги, а вентилями анодної групи – у межах від'ємної.

Що важливо. Момент початку комутації струму силовими електричними вентилями анодної групи не змінюється при зміні режиму роботи перетворювача. Стосовно силових електричних вентилів катодної групи ситуація інша. При зміні режиму роботи перетворювача (зміні струму навантаження, зміні ємності фази комутуючих конденсаторів, зміні кута керування транзисторами комутуючої ланки) змінюється величина випереджаючого кута регулювання. Відповідно змінюється момент початку комутації струму силовими електричними вентилями катодної частини перетворювача. Він стає «плаваючим».

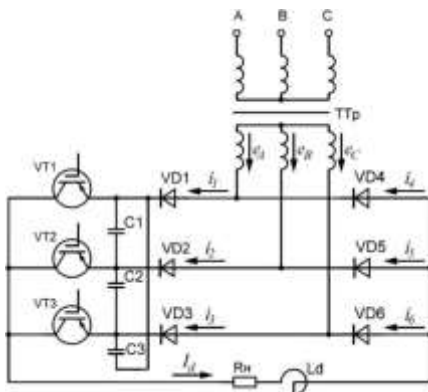


Рисунок 1 – Схема трифазного мостового

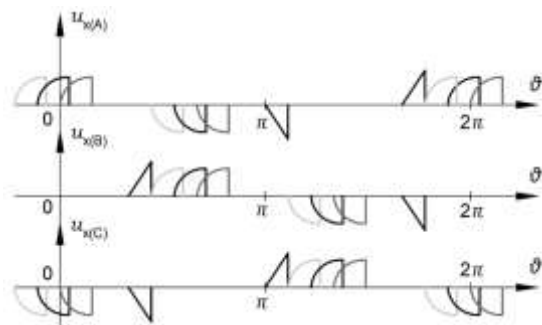


Рисунок 2 – Комутаційна напруга фаз вторинної

компенсаційного перетворювача

обмотки трансформатора

Перетворювач за досліджуваною схемою має підвищені енергетичні характеристики. Тому подібні роботи ведуться у далекому [2,3] і у близькому зарубіжжі, та в Україні [4,5,6].

**Мета роботи.** Отримати дані щодо особливостей експлуатації силових електричних вентилів трифазного мостового компенсаційного перетворювача та співвідношення для вибору класу вентилів, відповідно до вимог технологічного процесу, за умови, що частота імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки підвищена, порівняно з частотою напруги мережі живлення.

**Результати досліджень.** Оскільки мережа є стандартною симетричною трифазною системою прямого чергування фаз (1), послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів катодної (компенсаційної) частини перетворювача електричної енергії за схемою рис. 1 буде такою: VD1 → VD2 → VD3. Якщо знехтувати реактивним опором кола змінного струму, а комутаційний процес вважати миттєвим, то кожний силовий електричний вентиль катодної частини перетворювача вступатиме в роботу один раз за період і буде працювати протягом третини періоду. Послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки і протяжність роботи залежать від частоти їх перемикавання. Як впливає з мети роботи, основним завданням даної публікації якраз і є дослідження зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної групи, які працюють у компенсаційному режимі, залежно від частоти перемикавання транзисторів комутуючої ланки.

**1. Подвоєна частота перемикавання транзисторів комутуючої ланки.** Відповідно до чергування гармонік різних порядків, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки має бути зворотною: VT1 → VT3 → VT2. Однак, як показують дослідження, величина і форма комутуючої напруги залежить не тільки від зазначеного вище, а й від моменту подачі імпульсів керування на транзистори. Виходить, що дослідження величини і форми зворотної напруги силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача потребує розгляду декількох режимів.

*Режим 1. Момент включення в роботу транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.* Позначимо через  $\Delta\psi$  величину зсуву між цими моментами. Відповідно, досліджуваному режиму відповідає умова  $\Delta\psi = 0$ . Докладне дослідження комутуючої напруги при відсутності зсуву між моментами вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 та транзистора комутуючої ланки VT1 опубліковано авторами даної статті у [11].

Використовуючи схему рис. 1 та наведений вище алгоритм комутації вентилів та транзисторів комутуючої ланки, є можливість розраховувати криві струму фаз конденсаторної батареї. При цьому ураховано, що 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 фазу конденсаторної батареї C1 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 прийнято за додатний.

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

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0) \quad (2)$$

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

$$\text{I інтервал: } i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{c(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0) = u_c(0) = u_{c(1)k};$$

$$\text{II інтервал: } i_c = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{c(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{c(1)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_c(0).$$

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

$$\text{III інтервал: } i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{c(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{c(2)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_c(0) = u_{c(3)k};$$

$$\text{IV інтервал: } i_c = -2I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{c(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{c(3)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC} + u_c(0).$$

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

V інтервал:  $i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{C(4)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_c(0) = u_{C(5)k}$ .

VI інтервал:  $i_c = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3; \quad u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(5)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC} + u_c(0)$ .

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

Початкове значення кривої комутуючої напруги  $u_c(0)$  розрахуємо, виходячи з того, що середнє значення кривої  $u_c(\vartheta)$  на періоді дорівнює нулю:  $u_c(0) = 0$ . (3)

Ураховуючи останнє, отримаємо остаточні вирази закономірності зміни комутуючої напруги на окремих інтервалах періоду.

Результати такого аналізу протягом періоду основної частоти представлені графічно на рис. 3. 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. Усі криві побудовані за умови, що ємність фази конденсаторної батареї і струм навантаження перетворювача однакові в усіх режимах роботи.

Динаміка зміни величини і форми комутуючої напруги при зміні зсуву  $\Delta\psi$  між початком вступу в роботу силового електричного вентиля та транзистора комутуючої ланки однойменних фаз, за даними [7], представлена на рис. 4.

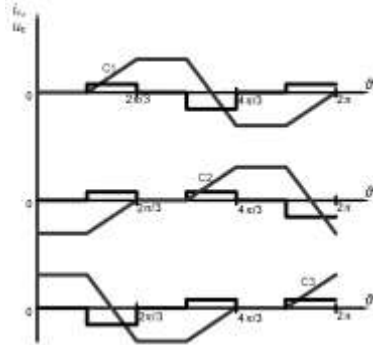


Рисунок 3 - Струм і напруга фаз конденсаторної батареї у режимі 1

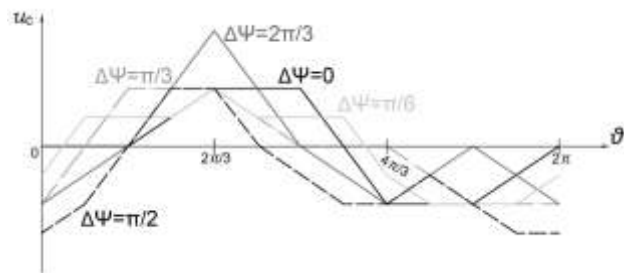


Рисунок 4 - Динаміка зміни комутуючої напруги при зміні зсуву  $\Delta\psi$  від 0 до  $2\pi/3$

Викладене містить обставини, важливі для дослідження основної мети публікації. Вони полягають у тому, що навіть при збігу моментів вступу в роботу силового електричного вентиля і транзистора комутуючої ланки однієї і тієї ж фази, на комутуючих конденсаторах є напруга, максимальне значення якої

$$u_{C\max} = I_d / 18fC \quad (4)$$

Крива напруги комутуючих конденсаторів має ділянки з нульовим значенням. Якщо зсув  $\Delta\psi$ , який є затримкою вступу в роботу транзистора комутуючої ланки, збільшується, то крива комутуючої напруги змінює свою форму. В інтервалі зміни  $\Delta\psi = 0 \dots \pi/3$  спостерігається зменшення протяжності інтервалу з нульовим значенням комутуючої напруги (при  $\Delta\psi = \pi/3$  він зникає повністю), але максимальне значення цієї напруги не змінюється і розраховується за (4). В інтервалі зміни  $\Delta\psi = \pi/3 \dots 2\pi/3$  змінюється не лише форма кривої комутуючої напруги, а й її величина. Вона збільшується. При  $\Delta\psi = 2\pi/3$  її максимальне значення удвічі більше від розрахованого за (4).

Скориставшись даними щодо закономірності зміни комутуючої напруги у режимі 1 (рис. 3), побудуємо криву зворотної напруги силового електричного вентиля VD1. Нехай першим вступив в роботу зазначений вентиль. Поки він працює, напруги на ньому немає. Після виходу цього вентиля з роботи, включається вентиль VD2. На вентилі VD1 з'являється напруга і рівняння контуру, що проходить через зазначені вентиля, буде таким:

$$e_A - e_B = u_{VD1(1)} + u_{C1} \quad (5)$$

Відповідно напруга на силовому електричному вентилі VD1 в інтервалі провідності вентиля VD2:

$$u_{VD1(1)} = e_{AB} - u_{C1} \quad (6)$$

Після виходу з роботи силового електричного вентиля VD2 включається вентиль VD3 і напругу на силовому електричному вентилі VD1 в інтервалі провідності вентиля VD3 розрахуємо наступним чином:

$$e_A - e_C = u_{VD1(2)} - u_{C3} \rightarrow u_{VD1(2)} = e_{AC} + u_{C3} \quad (7)$$

На рис. 5 відповідно до (6) та (7) побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1 у режимі 1, та показані складові цієї напруги.

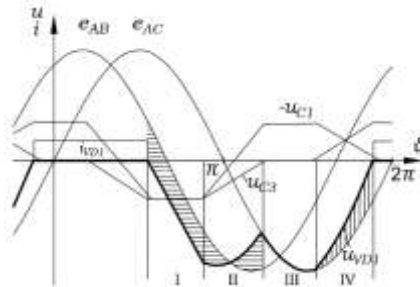


Рисунок 5– Зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача у режимі 1

Як бачимо, побудована крива має чотири інтервали з різною закономірністю зміни миттєвого значення. Така кількість ділянок обумовлена тим, що в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD2 напруга на конденсаторі C1 має два інтервали з різною закономірністю зміни. Така ж ситуація і в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD3, оскільки напруга на конденсаторі C3 також має два інтервали з різною закономірністю зміни. Найбільше миттєве значення напруги  $u_{VD1}$  приходить на ділянку III і, як бачимо, дорівнює амплітуді лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

*Режим 2. Момент включення в роботу транзистора VT1 має затримку відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 на величину до  $\pi/3$ .*

Динаміку зміни комутуючої напруги трифазного мостового компенсаційного перетворювача у режимі миттєвої комутації при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки ілюструє рис. 4.

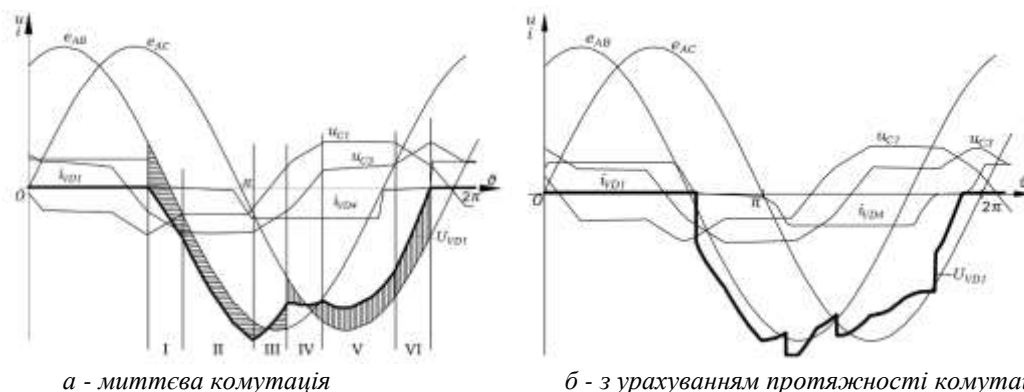
Характерною особливістю цієї сукупності кривих комутуючої напруги є те, що деякі з них мають ділянки з нульовим значенням та не є симетричними відносно осі абсцис. Дослідження впливу величини і форми комутуючої напруги на вибір класу силового електричного вентиля показало, що максимальне миттєве значення кривої зворотної напруги на вентилі знаходиться в межах ділянки II.

На рис. 6,а побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1 якраз у такому режимі роботи перетворювача, та показані складові цієї напруги. При побудові використані співвідношення (6), (7) і криві рис. 4. Як бачимо, крива зворотної напруги має шість ділянок. Це пояснюється тим, що в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD2 напруга на конденсаторі C1 має три інтервали з різною закономірністю зміни. Така ж ситуація і в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD3, оскільки напруга на конденсаторі C3 також має три інтервали з різною закономірністю зміни.

Максимальне миттєве значення зворотної напруги силових електричних вентилів катодної частини перетворювача збігається з кінцем ділянки II, тож його нормоване числове значення за відомих характеристик робочого режиму розраховується наступним чином:

$$u_{VD1max} = \sin(4\pi / 3 + \Delta\psi) - 0.5 \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Урахування протяжності комутаційного процесу змінює форму кривої зворотної напруги силових електричних вентилів. Дану обставину ілюструє рис. 6,б. Але і за цих умов найбільше значення кривої  $u_{VD1}$  можна розраховувати за співвідношенням (8).



а - миттєва комутація

б - з урахуванням протяжності комутації

Рисунок 6 – Зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача у режимі 2

Оскільки у режимах 1 та 2 максимальна величина комутуючої напруги однакова і найменша, то при подвоєній частоті перемикання транзисторів комутуючої ланки та за однакових показників технологічного процесу, перетворювач має найменший випереджаючий кут регулювання  $\alpha$ .

*Режим 3. Момент включення в роботу транзистора VT1 має затримку відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 на величину від  $\pi/3$  до  $2\pi/3$ .*

Характерною особливістю електромагнітного процесу перетворювача при регулюванні транзисторів комутуючої ланки у зазначеному інтервалі, є те, що збільшення затримки від  $\pi/3$  до  $2\pi/3$  супроводжується ростом комутуючої напруги. Це, в свою чергу, призводить до росту випереджаючого кута регулювання  $\alpha$  та зміни форми зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної групи. На рис. 7,а відповідно до (6) та (7) побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1 у режимі 3, та показані складові цієї напруги. Побудова відповідає режиму найбільшої затримки подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки, тобто  $\Delta\psi = 2\pi/3$ . Крива має чотири інтервали з різною закономірністю зміни миттєвого значення. Така кількість ділянок обумовлена тим, що в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD2 напруга на конденсаторі C1 має два інтервали з різною закономірністю зміни. Така ж ситуація і в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD3, оскільки напруга на конденсаторі C3 також має два інтервали з різною закономірністю зміни. Найбільше миттєве значення напруги  $u_{VD1}$  приходить на ділянку III і, як бачимо, дорівнює амплітуді лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Якщо аналіз кривої зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної частини перетворювача об'єднати з аналізом його енергетичних можливостей, то слід відмітити, що у режимі найбільшої затримки подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки, перетворювач має найбільший випереджаючий кут регулювання  $\alpha$  і генерує найбільші обсяги реактивної енергії. Але це не означає, що ефективність використання конденсаторів комутуючої ланки є найбільш високою.

Такий же енергетичний ефект можна отримати, якщо у режимі 1 удвічі зменшити ємність фази комутуючих конденсаторів, при незмінних усіх інших показниках технологічного процесу. Це і буде найбільш ефективний енергетичний процес. Крива зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної частини перетворювача у цьому процесі, побудована за тими ж показниками, що і у досліджуваних вище режимах, наведена на рис. 7,б.

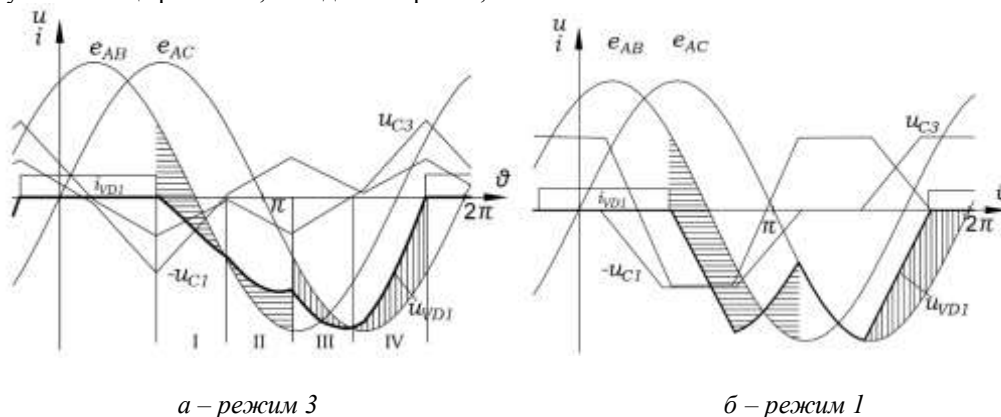


Рисунок 7– Зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача у режимі максимальної генерації реактивної енергії

Як бачимо, досягнення найбільш ефективного енергетичного процесу досліджуваного перетворювача не призводить до перенавантаження силових електричних вентилів. Максимальне значення кривої зворотної напруги не перевищує амплітуду лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

## 2. Чотирикратна частота перемикання транзисторів комутуючої ланки.

Відповідно до чергування гармонік різних порядків, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки при чотирикратній частоті має бути прямою: VT1 → VT2 → VT3.

Ураховуючи особливості схеми рис. 1 та наведений вище алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки, зміна стану досліджуваної системи відбувається через дванадцятку частину періоду ( $\pi/6$ ).

Знаючи закономірність струму фази конденсаторної батареї на окремих інтервалах періоду, розрахуємо комутуючу напругу, використовуючи співвідношення (2). Розрахунки подібні до попередніх випадків, кількість інтервалів кривої комутуючої напруги така ж, як і кількість інтервалів кривої струму. Результати аналізу, криві струму усіх фаз та комутуючої напруги при відсутності затримки моменту подачі

імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки ( $\Delta\psi = 0$ ), побудовані на рис. 8. На рис.9 для цього ж випадку побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1.

Характерною особливістю кривих комутуючої напруги є те, що вони не є симетричними відносно осі абсцис, і мають різне максимальне додатне та від'ємне значення. Дослідження впливу величини і форми комутуючої напруги на вибір класу силового електричного вентиля показало, що максимальне миттєве значення кривої зворотної напруги на вентилі знаходиться в межах ділянки VI, яка має протяжність  $\pi/6$  (рис. 9). У режимі миттєвої комутації найбільше нормоване значення кривої зворотної напруги збігається з моментом максимального значення лінійної ЕРС  $e_{AC}$  вторинної обмотки перетворювального трансформатора і розраховується як:

$$u_{VD1max} = \sin(3\pi/2) - 0.25 \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Якщо, згідно вимог технологічного процесу, потрібно здійснити його регулювання, така можливість у перетворювача є. Для цього потрібно збільшувати час затримки подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки. При цьому дещо змінюється форма кривої комутуючої напруги і її величина. Що ж стосується величини зворотної напруги на вентилях катодної частини, то її максимальне значення можна розраховувати за співвідношенням (9), не зважаючи на те, що вона дещо змінюється за формою. Викладене ілюструє рис. 10.

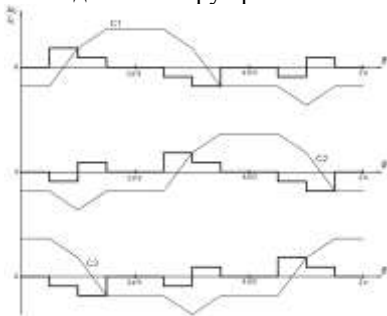


Рисунок 8 – Струм і напруга фаз конденсаторної батареї при чотирикратьній частоті імпульсів керування

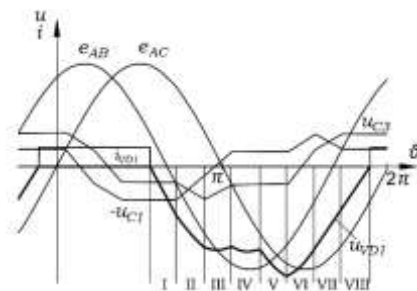
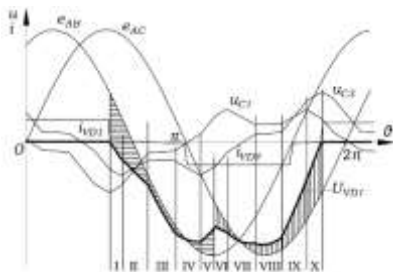
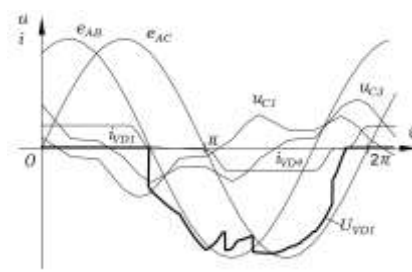


Рис. 9 –Зворотна напруга на вентилі VD1 при  $\Delta\psi = 0$  і чотирикратьній частоті імпульсів керування



а - миттєва комутація  
Рисунок 10 - Зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача у режимі 2



б - з урахуванням протяжності комутації

Як випливає з рис. 10, урахування протяжності комутаційного процесу змінює форму кривої зворотної напруги силових електричних вентилів, але і за цих умов найбільше значення кривої  $u_{VD1}$  можна розраховувати за співвідношенням (9).

### 3. Більш високі частоти перемикання транзисторів комутуючої ланки.

Не вдаючись до детального розгляду дослідження, оскільки його методика залишається незмінною для усіх частот імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, на рис. 11 наведено побудову кривих струму і напруги фаз конденсаторної батареї при восьмикратьній частоті. А на рис. 12 представлені криві комутуючої напруги фази конденсаторної батареї C1 при чотирикратьній, восьмикратьній, шістнадцятикратьній та тридцятидвократьній частоті.

З останнього рисунка видно, що комутуюча напруга, при збільшенні частоти суттєво форму не змінює, але відбувається більш плавний перехід між інтервалами  $\vartheta$ , адже при збільшенні частоти імпульсів керування, величина інтервалу зменшується. Також, можна відмітити, що при восьмикратьній частоті імпульсів керування, напруга на конденсаторній батареї C1 має більше значення, порівняно з іншими частотами імпульсів керування, при однаковій ємності конденсаторної батареї в усіх випадках.

А дослідження кривих напруги  $u_{VD1}$  показують, що при більш високих частотах регулювання транзисторів комутуючої ланки, максимальне значення зворотної напруги силових електричних вентилів катодної частини перетворювача дорівнює лінійній напрузі вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

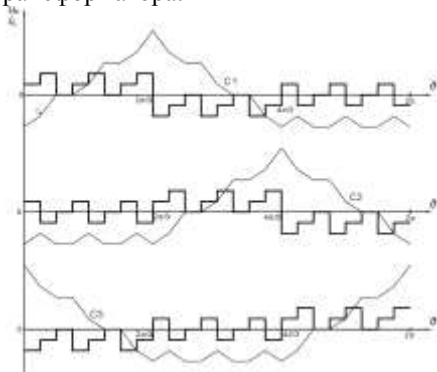


Рисунок 11 – Струм і напруга фаз конденсаторної конденсаторної батареї при восьмикратній частоті імпульсів керування

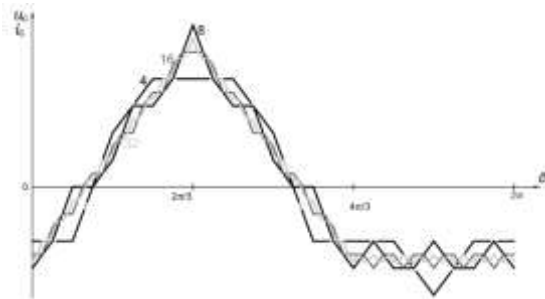


Рисунок 12 – Комутуюча напруга фази C1 батареї при підвищеній частоті імпульсів керування транзисторами

### Висновки.

Проведені дослідження підтверджують факт залежності величини і форми зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної (компенсаційної) групи від режиму роботи перетворювача, а саме від умов перезаряду конденсаторної батареї. Основними факторами цього є зсув за фазою між моментом вступу в роботу діодів компенсаційної частини перетворювача і транзисторів та частота імпульсів керування останніми.

При збільшенні частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, крива комутуючої напруги стає більш плавною за рахунок зменшення протяжності інтервалів перезаряду конденсаторів, а її максимальне додатне значення збільшується. Тож забезпечення ефективного енергетичного процесу перетворювача досягається узгодженням вибору ємності фази комутуючих конденсаторів та інтервалом затримки подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля.

Узагальнений висновок стосовно умов роботи електричних вентилів полягає у тому, що в компенсаційних перетворювачах нового покоління, до яких відноситься досліджуваний трифазний мостовий компенсаційний перетворювач, максимальне значення зворотної напруги на силових електричних вентилях компенсаційної частини не перевищує напругу на інших вентилях.

### Список використаної літератури

1. Бойко В.С. Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач. Патент України на корисну модель № 142864, 2020.
2. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
3. 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: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
4. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.
5. Chyzenko O.I., Trach I.V. An impact of changes in the inductance of distributions network on the modes and parameters of equipment of thyristor compensator of reactive power. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.048>.
6. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В., Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. №6. С. 62-68.
7. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 3 (Квіт.2023),013. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.



V. Boiko<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642  
O. Shkardun<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114  
B. Linduk<sup>1</sup>, student, ORCID 0009-0006-6343-6292

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## DEPENDENCE OF THE VOLTAGE ON THE POWER ELECTRIC DIODES OF THE COMPENSATION CONVERTER ON THE FREQUENCY OF THE TRANSISTOR REVERSALS OF THE COMMUTATING LINK

*Studies of compensation-type electrical energy converters, conducted both by the authors of the publication and by other scientists, show that their energy characteristics and operating conditions of power equipment depend on commutating voltages. The tested three-phase bridge compensation converter contains one commutating link consisting of a three-phase capacitor battery and a three-phase group of fully controlled devices. The latter are a capacitor bank switch, performing the functions of switching capacitors in such a way as to ensure the energy process of the converter, in which its reactive energy is compensated, or generated, if necessary. At the same time, the operating conditions of the power equipment of the converter also change. The main content of the study is the analysis of the components of the reverse voltage of the power electric diodes of the compensation part of the converter and the dynamics of its change at an increased frequency of control pulses of the transistors of the commutating link. This is required when determining the class of diodes in the case of introducing a converter according to the scheme under study into production. The question of the class of diodes is considered in the context of the energy capabilities of the converter when regulating the operating mode according to the requirements of the technological process. The results of the research relate to the control of transistors of the commutating link by pulses of double, quadruple and eightfold frequency. As a result, relationships were obtained for calculating the maximum instantaneous value of the reverse voltage of electric power diodes in various operating modes of the converter. The ranges of the delay in the moment of supply of control pulses to the transistors of the commutating link are revealed. The generalized conclusion shows that on the electric power diodes of the compensation part of the converter, the reverse voltage does not exceed the voltage on other valves. Refer. 11, fig. 12.*

**Keywords:** capacitor battery, commutating, commutating voltage, electric diod.

### References

1. Boiko V.S. Three-phase bridge compensation converter: Patent UA for utility model № 142864, 2020. (Ukr).
2. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
3. 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: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
4. Butkevych O., Chyzhenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).
5. Chyzhenko O.I., Trach I.V. An impact of changes in the inductance of distributions network on the modes and parameters of equipment of thyristor compensator of reactive power. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.048>.
6. Butkevych O.F., Chizhenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V., Influence of FACTS on the electric network mode during direct start of a powerful asynchronous machine as part of a complex load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. pp. 62-68.
7. Boyko, V. and Shkardun, O. 2023. Conditions for recharging the capacitors of the commutating device of a three-phase bridge compensation converter. *Technical electrodynamics*. 3 (Apr.2023),013. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.03>

Надійшла: 14.11.2023

Received: 14.11.2023