

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ.

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.314.1

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339783

В.С. Бойко¹, д-р техн. наук, ORCID 0000-0003-1018-0642

О.В. Шкардун¹, аспірант, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМУТАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС У ТРИФАЗНОМУ ДВОМОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДНІЄЮ КОМУТУЮЧОЮ ЛАНКОЮ

Наведені результати аналізу енергетичних процесів у досліджуваному трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Досліджуються режими роботи, за яких комутаційний процес у силових електричних вентилях починається в інтервалі роботи транзистора своєї фази. Виявлено вплив моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки на струм фази конденсаторної батареї, величину і форму комутуючої напруги та основні енергетичні показники перетворювача, якими є кут комутації та випереджаючий кут регулювання. Висновки аналітичних досліджень підтверджують результати схематехнічного моделювання, проведеного к пакеті Micro Cap. Описана методика моделювання, наведені її результати, проведено аналіз результатів. Остаточний висновок по роботі зроблено виходячи з величини кутів комутації і регулювання. Найбільш енергоефективними є режими роботи, при яких комутація струму силовими електричними вентилями компенсаційної частини перетворювача відбувається в межах роботи транзисторів комутуючої ланки наступної фази. Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схематехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Стаття є продовженням публікації [1] результатів дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі. Згідно наведеної на рис. 1 схеми, він живиться через трифазний трансформатор з двома вторинними вентильними обмотками, з'єднаними за прямою та зворотною зіркою. Дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD1 – VD3 та VD4 – VD6) працюють у компенсаційному режимі. Інші дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD7 – VD9 та VD10 – VD12) відносяться до некомпенсаційної частини. Комутуюча ланка перетворювача складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT). Також до складу перетворювача входить двофазний зрівноважувальний реактор і навантаження R_d та L_d .

Результати дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі опубліковані також в [2] та інших публікаціях, присвячених пристроям силовій електроніки з конденсаторами у силових колах. Розробка і дослідження таких пристроїв проводиться як у нашій країні [3,4], так і за її межами [5,6].

У публікації [1] ставилося за мету визначення впливу керування транзисторами комутуючої ланки імпульсами чотирикратної частоти на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями, величину кутів регулювання і комутації, та визначення енергоефективних режимів роботи. Обсяг досліджень був обмежений режимами роботи, при яких комутаційний процес у силових електричних вентилях компенсаційної частини збігався у часі з інтервалом роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази. Особливості електромагнітних процесів залежали від моменту подачі імпульсів на транзистори комутуючої ланки. Тож було досліджено декілька випадків. Коли початок

комутації силового електричного вентиля VD1 починається в інтервалі роботи VT2, а закінчується – коли VT2 виходить з роботи. Коли комутація силового електричного вентиля VD1 починається і закінчується в інтервалі роботи VT2. Коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 збігається з моментом вступу в роботу транзистора VT2.

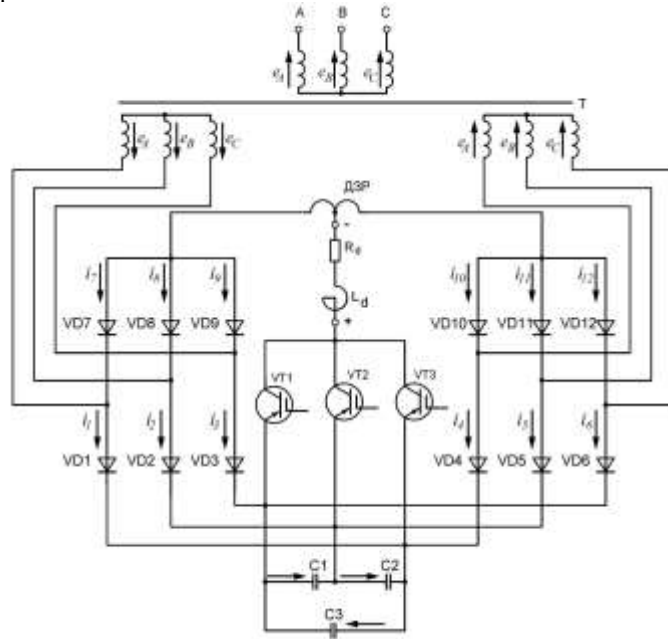


Рисунок 1 - Схема трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

З погляду можливості генерування максимальних обсягів реактивної енергії, тобто, досягнення високих показників енергоефективності, найкращим є останній випадок. За його умов випереджаючий кут регулювання має найбільше значення, а кут регулювання у всіх випадках – однаковий.

У всіх зазначених вище випадках, в інтервалі комутації струм фази конденсаторної батареї змінюється за законом

$$i_c = \frac{1}{3} I_d - \frac{2}{3} i_k \quad (1)$$

Однак, опубліковані матеріали є лише частиною досліджень електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Мета роботи. Узагальнити результати досліджень електромагнітних процесів при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, та спираючись на його основні енергетичні характеристики зробити висновок щодо найбільш енергоефективних режимів роботи.

Результати досліджень. Система вхідної ЕРС трифазного перетворювального трансформатора схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

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

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Режим роботи з випереджаючим кутом регулювання α (компенсаційний режим) мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD6. Послідовність їх вступу в роботу буде такою: VD1 → VD2 → VD3 та VD4 → VD5 → VD6. Це відповідає системі прямого чергування фаз трифазних ЕРС перетворювального трансформатора. Між моментами вступу в роботу зазначених трійок силових електричних вентилів має місце зсув за фазою, що дорівнює половині періоду, відповідно до схеми з'єднання вентильних обмоток.

Чотирикратна частота імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки також відповідає прямому чергуванню фаз. Відповідно, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки VT1 → VT2 → VT3. Тобто, стосовно алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів

комутуючої ланки, режим роботи перетворювача, досліджений у [1], та той, результати якого представляє поточна публікація – абсолютно однакові.

Але у поточному дослідженні затримка подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки менша, ніж у попередньому. І якщо у попередньому дослідженні комутаційний процес у силовому електричному вентилі проходив у межах роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, то у поточному дослідженні він проходить у межах роботи своєї фази. Зрозуміло, що кінець попереднього робочого режиму є початком наступного.

Ураховуючи викладені вище фактори, здійснено графічну побудову кривих струму фази конденсаторної батареї для усіх можливих варіантів досліджуваного режиму роботи перетворювача. Крива половини періоду струму фази конденсаторної батареї представлена на рис. 2 у вигляді чотирьох графіків. Графічна побудова здійснена якісно, без урахування величини випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача.

На рис. 2,а зображено випадок, який є межею між попереднім режимом роботи перетворювача і наступним. Результати його дослідження викладено у [1].

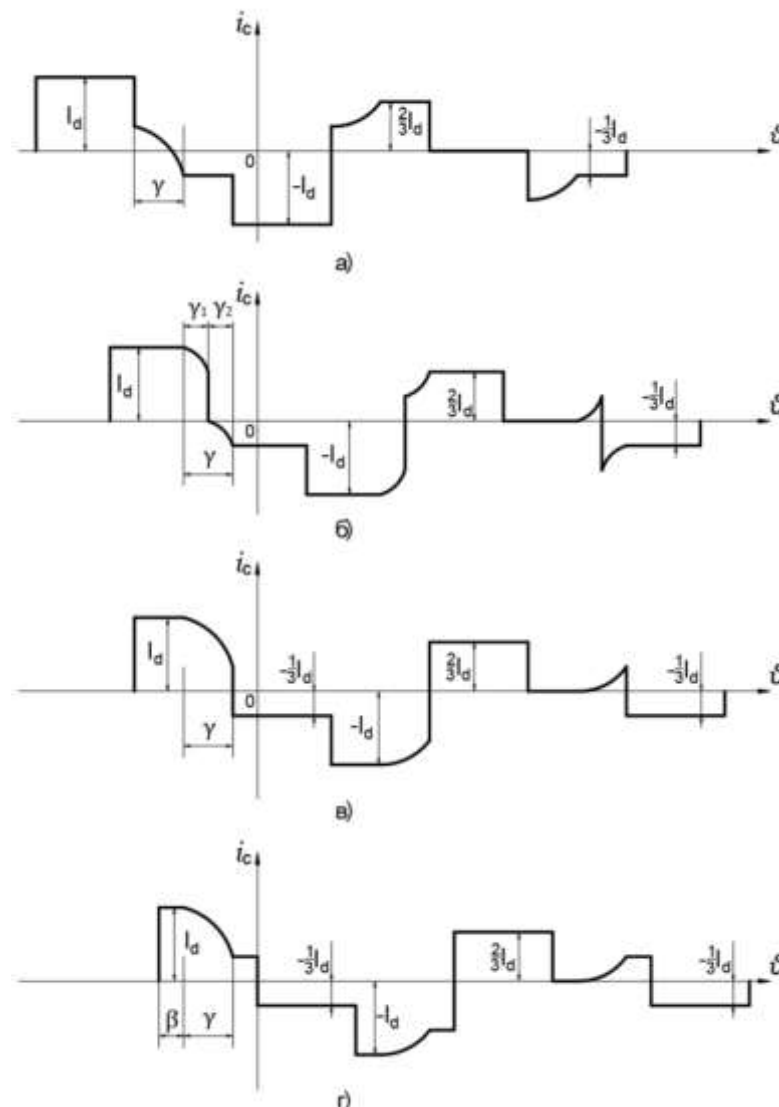


Рисунок 2 – Форма струму фази конденсаторної батареї

Якщо затримку подачі імпульсу керування транзисторами комутуючої ланки дещо зменшити, таким чином, щоб інтервал комутації (γ) силового електричного вентиля VD1 проходив через момент перемикання з транзистора VT1 на VT2, струм фази конденсаторної батареї поділяється на дві частини. Їх протяжність (γ_1) та (γ_2) у сумі дорівнює куту комутації (γ). Для однозначності введемо у розгляд коефіцієнт n , який визначатиме частку кута комутації (γ_1) відносно усього кута комутації ($\gamma_1 = n\gamma$). При цьому частка кута комутації ($\gamma_2 = (1 - n)\gamma$ чи $\gamma_2 = \gamma - \gamma_1$). Що і зображено на рис. 2,б.

Режим роботи перетворювача у такому випадку буде продовжуватись, допоки зміна моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки не зменшить частку кута комутації (γ_2) до нуля. Цей випадок, зображений на рис. 2,в, є межею з наступним.

Наступний випадок, зображений на рис. 2,г. Він відповідає подальшому зменшенню затримки подачі імпульсів керування. При аналітичному дослідженні цю величину позначимо через β , що також показано на рис. 2,г.

Спільним для усіх трьох випадків робочого режиму перетворювача, який досліджується у поточній роботі, є вираз струму фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації:

$$i_c = I_d - \frac{2}{3} i_k \quad (3)$$

Для розрахунку конденсаторної напруги (комутуючої напруги), застосуємо співвідношення:

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^g i_c d\vartheta + u_c(0) \quad (4)$$

З викладеного вище випливає, що дослідженню підлягають два випадки, струм фази конденсаторної батареї яких зображено на рис. 2,б та рис. 2,г. Випадок робочого режиму перетворювача, зображений на рис. 2,в, є межею двох згаданих вище випадків і його дані мають впливати з результатів аналізу випадку 1 та випадку 2.

Оскільки подальше дослідження проводитиметься із застосуванням нормованих співвідношень, наведемо застосовану при цьому систему базисних величин:

базисна напруга $U_\delta = \sqrt{3} E_m$;

базисний струм: $I_\delta = \sqrt{3} E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки;

базисна частота $\omega_\delta = \omega = 314$;

базисна реактивність кола змінного струму: $x_\delta = \sqrt{3} E_m / 2I_d$.

При цьому нормовані вирази співвідношень (3) та (4) набудуть вигляду:

- струм фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації

$$i_{C*} = 1 - \frac{2}{3} i_{k*} \quad (5)$$

- комутуюча напруга при з'єднанні конденсаторної батареї трикутником

$$u_{CA*} = \frac{3}{2} x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \int_0^g i_{k*} d\vartheta + u_{C*}(0) \quad (6)$$

Спільний розв'язок (5) та (6) дає змогу отримати закономірність зміни комутуючої напруги у досліджуваному режимі роботи перетворювача. Розрахунок проведено за окремими інтервалами.

Випадок 1.

I інтервал: $i_{C*} = 1 - n \frac{2}{3} i_{k*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{CA*(1)} = \frac{3}{2} x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \int_0^g i_{C*} d\vartheta + u_{C*}(0) = x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \left(\frac{3\vartheta}{2} - n \int_0^g i_{k*} d\vartheta \right) + u_{C*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \gamma_1, \quad u_{CA*(1)k} = x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k*} d\vartheta \right) + u_{C*}(0).$$

II інтервал: $i_{C*} = -(1-n) \frac{2}{3} i_{k*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{CA*(2)} = \frac{3}{2} x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \int_0^g i_{C*} d\vartheta + u_{CA*(1)k} = -x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \left((1-n) \int_0^g i_{k*} d\vartheta \right) + x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k*} d\vartheta \right) + u_{C*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \gamma_2, \quad u_{CA*(2)k} = x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k*} d\vartheta \right) + u_{C*}(0).$$

III інтервал: $i_{C*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_2)$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$

IV інтервал: $i_{C^*} = -1$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1)$;

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_1)$, $u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + 3\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$

V інтервал: $i_{C^*} = -1 + n \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{C\Delta^*(5)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} + \frac{n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + 3\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_1$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

VI інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{2} + (1-n) \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{3\vartheta}{4} + (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{5\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$

VII інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(7)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{5\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_2)$, $u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{1\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$

VIII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1)$;

$$u_{C\Delta^*(8)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - \frac{1-n}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(8)k}.$$

IX інтервал: $i_{C^*} = n \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{C\Delta^*(9)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_1$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = -\frac{1}{2} + (1-n) \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{C\Delta^*(10)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{4} + \frac{1-n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} - \frac{\gamma_2}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(11)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} - \frac{\gamma_2}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \pi/6 - \gamma_2, \quad u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} + \frac{3\gamma_1}{2}\right) + u_{C^*}(0)$$

$$\text{XII інтервал: } i_{C^*} = 1, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1);$$

$$u_{C\Delta^*(12)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = (\pi/6 - \gamma_1), \quad u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0).$$

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з умови, що крива комутуючої напруги, не має постійної складової, тобто, її середнє значення за період дорівнює нулю. Виконавши розрахунок, подробиці якого тут не наведено, отримаємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{(5n+1)\gamma}{4} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) \quad (7)$$

Випадок 2.

$$\text{I інтервал: } i_{C^*} = 1 - \frac{2}{3} i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$$

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\vartheta}{2} - \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \gamma, \quad u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{II інтервал: } i_{C^*} = 1/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta);$$

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta), \quad u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{III інтервал: } i_{C^*} = -1/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/6;$$

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \pi/6, \quad u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{IV інтервал: } i_{C^*} = -1, \quad 0 \leq \vartheta \leq \beta;$$

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \beta, \quad u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{V інтервал: } i_{C^*} = -1 + \frac{1}{3} i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$$

$$u_{C\Delta^*(5)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{В кінці інтервалу при } \vartheta = \gamma, \quad u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

$$\text{VI інтервал: } i_{C^*} = -2/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta);$$

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = -x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VII інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(7)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VIII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(8)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(8)k}.$$

IX інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(9)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = 1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(10)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} - \frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(11)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} - \frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XII інтервал: $i_{C^*} = 1$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(12)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з тих же умов, що і раніше. При цьому отримаємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\beta - \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) \quad (8)$$

Проаналізуємо вирази (7) та (8). Якщо у випадку 1 затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки буде такою, що частина кута комутації $\gamma_2 = 0$. Іншими словами, при цьому $n = 1$. За цієї умови з виразу (7) отримуємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{3\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) \quad (9)$$

Останнє співвідношення відповідає межі першого випадку робочого режиму перетворювача, який досліджується. Він представлений на рис. 2,в.

Якщо цю ж саму межу отримати з виразу (8), у нього потрібно підставити $\beta = (\pi/6 - \gamma)$. В результаті отримаємо те ж саме співвідношення (9).

Останні висновки є досить важливими. З одного боку вони підтверджують правомірність теоретичних міркувань щодо досліджуваного робочого режиму та справедливості співвідношень (7) і (8). З іншого – дають підстави для твердження, що поділ на частини стуму фази конденсаторної батареї в

інтервалі комутації не є результатом поділу на частини кривої струму комутації силових електричних вентилів.

Підтвердимо отримані висновки шляхом застосування моделювання у системі Micro Cap 12. Відповідно до схеми рис. 1 досліджуваного трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, на рис. 3 наведена його схмотехнічна модель, на якій зазначені параметри елементів моделі і струми її віток.

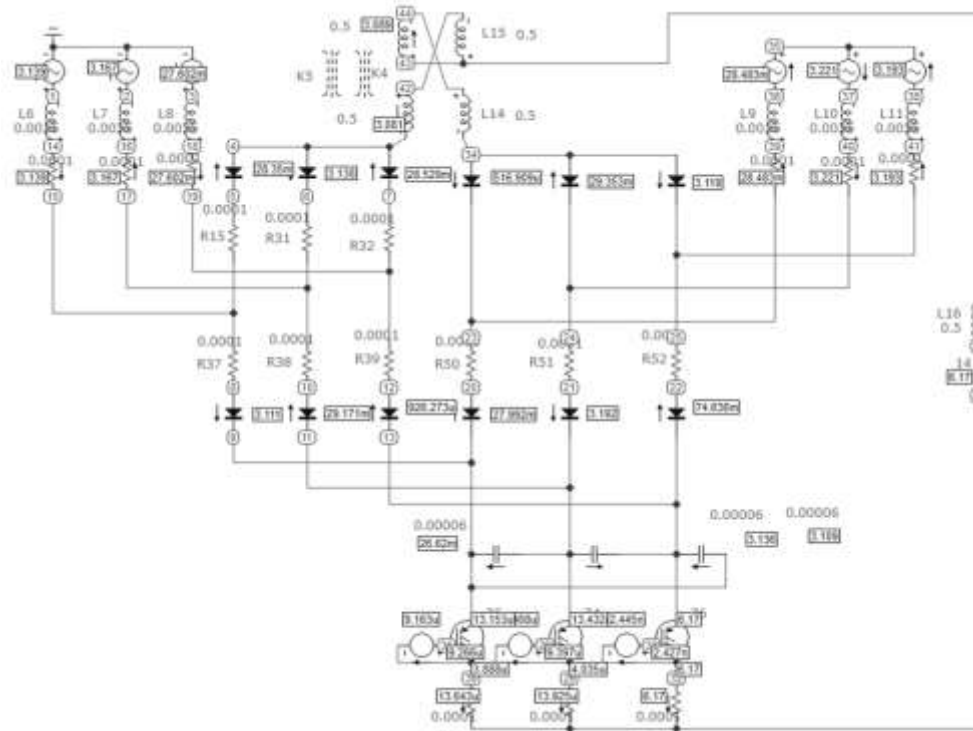


Рисунок 3 – Схмотехнічна модель трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

На рис. 3 відсутні дані щодо характеристики джерела живлення. Змодельована трифазна система ЕРС прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= 57.8 \sin(\vartheta + 0.523); \\ e_B &= 57.8 \sin(\vartheta - 1.57); \\ e_C &= 57.8 \sin(\vartheta + 2.618). \end{aligned} \quad (10)$$

Як бачимо, амплітудне значення фазної ЕРС трансформатора дорівнює 57.8 В.

Змодельуємо усі випадки робочого режиму перетворювача, які досліджувались аналітично. Мова йде про випадок 1, випадок 2 та їх межу. Результати моделювання представимо у графічній формі. Для аналізу необхідно мати криву лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора u_{CA} , оскільки точка переходу її через нульове значення є моментом природної комутації. Також у роздруківці результатів схмотехнічного моделювання має бути крива комутуючої напруги u_C , напруги на транзисторі комутуючої ланки u_{VT1} і струму силового електричного вентиліа i_{VD1} .

Дані результатів схмотехнічного моделювання наведені на рис. 4.

Числові дані режимів роботи перетворювача, які моделюються, знаходяться у колонках даних під Left та Right. Відлік часу здійснюється у мілісекундах. Значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних. Інші числові дані:

R(12)*10 – величина струму силового електричного вентиліа VD1 (A), помножена на 10;

I(13,9)(V)*10 – струм фази конденсаторної батареї (A);

V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора (В);

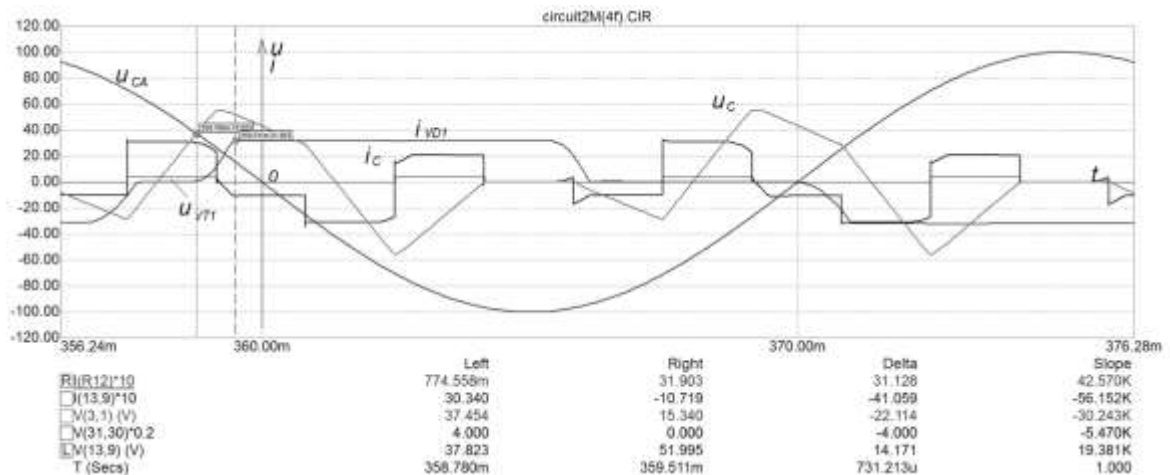
V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (В);

V(31,30)(V) – імпульс керування транзистором VT1 комутуючої ланки.

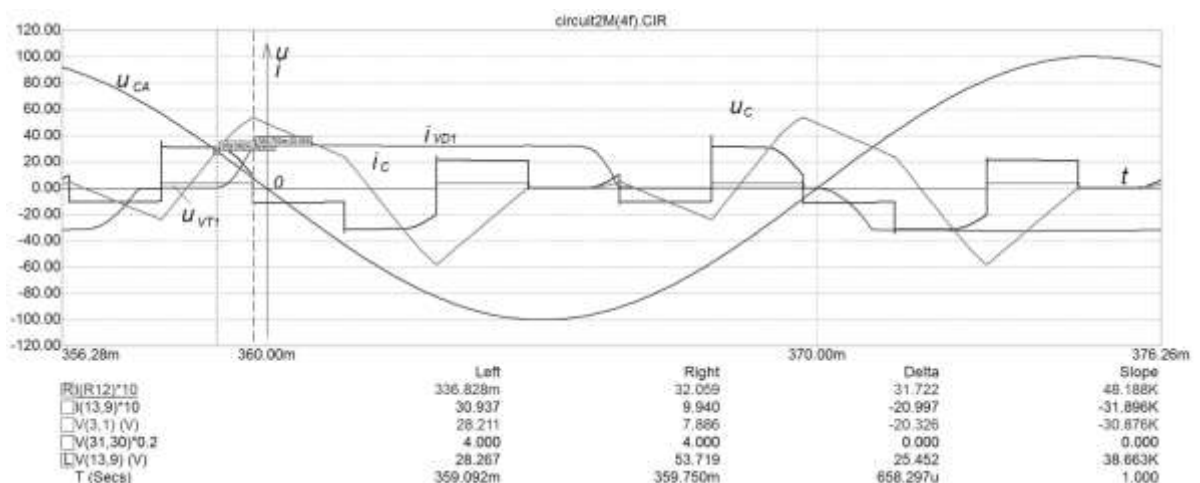
На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою. За цим показником розраховуємо випереджаючий кут регулювання $\alpha = \arcsin[u_{C*}(0)]$.

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right. Різниця часу між початком комутаційного процесу і його закінченням – Delta. Урахувавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 180° , є можливість розрахувати кут комутації у градусах, домноживши числове значення Delta на 18.

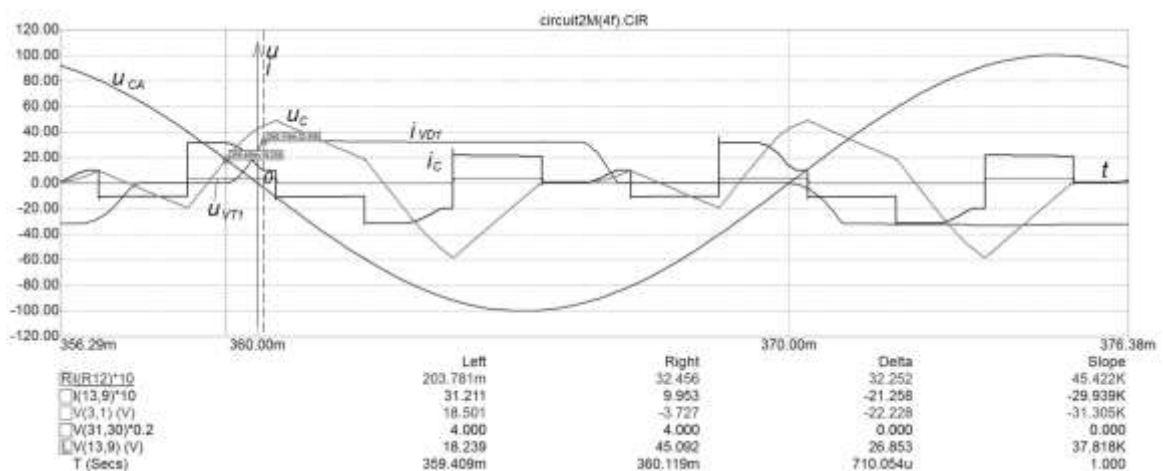
Основні характеристики енергетичного процесу трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, визначені і розраховані за результатами схемотехнічного моделювання, занесені у табл. 1.



а – випадок 1



б – межа випадку 1 і випадку 2



в – випадок 2

Рисунок 4 – Результати моделювання

Аналіз результатів числового розрахунку на основі даних схемотехнічного моделювання, показує стійку тенденцію до зменшення величини комутуючої напруги, у разі регулювання моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, шляхом зменшення величини затримки. Також звернімо увагу, що в усіх досліджуваних випадках робочого режиму перетворювача, початок комутації струму силовими електричними вентилями припадає на інтервал роботи транзистора комутуючої ланки своєї фази. Це є принциповою відмінністю щодо умов комутаційного процесу, дослідженого у [1].

Таблиця 1 – Результати схемотехнічного моделювання

Режим роботи	Числова енергетична характеристика		
	u_C [В]	α [°]	γ [°]
Випадок 1	37.6	22.1	13.16
Межа випадків 1 і 2	28.2	16.4	11.84
Випадок 2	18.4	10.6	12.78

За інших однакових умов, зменшення величини комутаційної напруги однозначно призводить до зменшення випереджаючого кута регулювання α . Що ж стосується величини кута комутації γ , то у його зміні будь-якої стійкої тенденції не спостерігається. Тим не менше, отримані у дослідженні результати є досить обнадійливими. Тому що у компенсаційних перетворювачах, навіть при закономірності зміни форми струму комутації силових електричних вентилів близькою до квадратичної, зсув першої гармоніки вхідного струму перетворювального трансформатора не перевищує двох третин кута комутації. Ураховуючи останнє, робота перетворювача у режимі, який підпадає під випадок 2, є також ефективною. У такому випадку перетворювач не здатний генерувати у мережу реактивну енергію, але власну реактивну енергію компенсує.

Висновки. Матеріали вступу до статті та результати досліджень поточної публікації дозволяють зробити узагальнюючі висновки щодо енергетичних спроможностей трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, у випадку регулювання його робочого режиму подачею на транзистори комутуючої ланки імпульсів керування чотирикратної частоти.

1. Якщо комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, основні величини енергетичного процесу не залежать від затримки подачі імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Але випереджаючий кут регулювання набуває найбільших значень. Тому такий режим роботи є енергоефективним і рекомендується для застосування у випадках стабільного навантаження перетворювача.

2. Якщо комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки своєї фази, основні величини енергетичного процесу залежать від затримки подачі імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Причому, при зменшенні величини затримки спостерігається стійка тенденція до зменшення величини випереджаючого кута регулювання. У цьому режимі робота перетворювача також є ефективною, але спроможність генерувати у мережу реактивну енергію – менша.

3. Підтверджено адекватність і прийнятність застосованої методики аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання.

4. Енергетична характеристика досліджуваного перетворювача при регулюванні режимів його роботи подачею імпульсів керування чотирикратної частоти на транзистори комутуючої ланки, є ефективною при живленні споживачів з різними характеристиками. Це обумовлено особливостями схемотехнічної побудови досліджуваного перетворювача та широкими можливостями щодо регулювання процесу живлення споживачів постійного струму.

Список використаної літератури

1. В.С. Бойко, О.В. Шкардун, 2025. Комутаційний процес у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 1, С. 96-105, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324269>.
2. Бойко, В. 2024. Комутуюча напруга трифазного двомостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 3 (Трав 2024), 025. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.
3. 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>.

4. 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.

5. 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.

6. 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>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

COMMUTATING PROCESS IN A THREE-PHASE TWO-BRIDGE COMPENSATION CONVERTER WITH A SINGLE COMMUTING LINK

The article presents the results of the analysis of energy processes in the investigated three-phase two-bridge compensating converter at a four-fold frequency of control pulses of the transistors of the commutating link. The operating modes are investigated, in which the commutating process in the power electrical valves begins in the operating interval of the transistor of its phase. The influence of the moment of supplying control pulses to the transistors of the commutating link on the phase current of the capacitor battery, the magnitude and shape of the commutating voltage and the main energy indicators of the converter, which are the commutating angle and the leading angle of regulation, is revealed. The conclusions of the analytical studies confirm the results of the circuit simulation carried out in the Micro Cap package. The modeling technique is described, its results are presented, and the analysis of the results is carried out. The final conclusion on the work is made based on the magnitude of the commutating and regulation angles. The most energy efficient operating modes are those in which the current commutating by the power electrical valves of the compensating part of the converter occurs within the operating limits of the transistors of the commutating link of the next phase. Refer. 6, fig. 4, table. 1.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. V.S. Boiko, O.V. Shkardun, 2025. Commutating process in a three-phase two-bridge compensation converter. *Energy: economics, technologies, ecology*, No. 1, pp. 96-105, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324269>

2. Boiko, V. 2024. Commutating voltage of the three-phase double-bridge compensating converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 3 (May, 2024), 025. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. c.25-35.

3. 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. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).

4. 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.

5. 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.

6. 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>.

Надійшла: 23.04.2025

Received: 23.04.2025