

А.П. СІНОЛИЦЬЙ, д-р техн. наук, проф., В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц.,
Є.С. ДУБ, асистент, О.М. КУЛИК, магістрант, Д.О. ГРИВА, магістрант.
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ВЗАЄМВПЛИВУ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ГРУПИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З УДАРНО-ЦИКЛІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Описана робота групи випрямлячів від загального трансформатора на прикладі екскаватора ЕКГ-5. Проаналізовано три різних режими, зумовлених взаємним впливом комутаційних процесів, що відбуваються в випрямлячах і призводять до зміни кута безпечного інвертування.

Проблема та її зв'язки з науковими та практичними завданнями. Виникнення режимів електромагнітної сумісності групового електроприводу зумовлене живленням групи електроприводів від мережі з загальним трансформатором обмеженої потужності за наявності ударно-циклічних навантажень. Найбільш наглядно вказані ознаки спостерігаються в електроприводі механізмів екскаватора. Виникнення електромагнітних процесів та поява аномальних і аварійних режимів у силовій ланці зумовлена багаторежимністю комутації окремих механізмів. У роботі розглядається варіант живлення перетворювачів механізмів від загальної вторинної обмотки трансформатора, що спричиняє негативний взаємовплив на окремих інтервалах сумісної роботи групи електроприводів. Проаналізувавши навантажувальну діаграму рис. 1, стало відомо, що найбільш проблематичним у цьому випадку є небезпечні режими взаємовпливу, які характеризуються одночасною комутацією ключів у відповідних фазах мережі механізмів зі значною розбіжністю потужностей, з одного боку, і широким діапазоном зміни їх робочих характеристик, з іншого. Оскільки дослідження впливу в такій схемі не проводилося, то стає неможливим створення ефективних і надійних систем живлення групи електроприводів.

Аналіз досліджень і публікацій. Авторами проводилися дослідження режимів взаємовпливу за різних схемних особливостей ввімкнення електроприводів механізмів. Так, характер впливу на мережу живлення одного перетворювача розглянуто в [1,2], авторами досліджено характер спотворення напруги мережі, що впливає на інші споживачі, а також на сам перетворювач. Сумісний вплив двох перетворювачів через загальну мережу живлення проводився в [3,4], в [3] розглядався взаємовплив через окремі трансформатори, а в [4] розглядався вплив через трансформатор з подвійною вторинною обмоткою. Дослідження комутаційних процесів у системах групового живлення n -ої кількості перетворювачів розглядалося в [5]. Розроблені авторами методи дійсні лише для окремих випадків і їх неможливо застосувати в запропонованій роботі, тому необхідно застосовувати інші методи.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення граничних параметрів взаємовпливу (кутів керування і комутації), обґрунтування схем і заходів щодо обмеження граничних параметрів аномальних аварійних режимів роботи з ударно-циклічними навантаженнями.

Викладення матеріалу та результати. Під час дослідження режимів взаємовпливу групи перетворювачів особливу увагу слід спрямувати на дослідження режимів з ударно-циклічними навантаженнями.

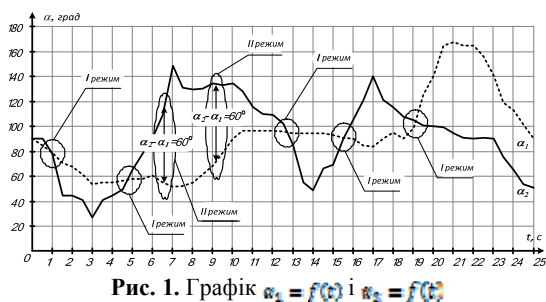


Рис. 1. Графік $\alpha_1 = f(t)$ і $\alpha_2 = f(t)$

За приклад взято роботу екскаватора ЕКГ-5, який встановлено на Ганнівському кар'єрі ПАТ «ПівнГЗК» м. Кривого Рогу. Живлення головних приводів екскаватора відбувається від одного двообмоткового трансформатора. Система електроприводу представляє собою ТП-Д.

Взаємний вплив комутаційних процесів, що відбуваються у випрямлячах, приводить до зміни кута безпечного інвертування і, відповідно, межі безпечного інвертування. Зміни зумовлені спотворенням лінійної напруги мережі, що діє в контурі комутації.

З дослідження доцільно виключити електроприводи механізмів ходу і напору, так як перший не має режиму сумісної роботи з іншими приводами, а другий ма-

ло задіяний під час роботи електроприводів механізмів підйому і повороту. Отже, основна увага має бути спрямована щодо аналізу особливостей сумісної роботи тиристорних перетворювачів електроприводів механізмів підйому і повороту.

Силові перетворювачі зібрані за шестипульсною мостовою схемою (рис. 2). У всіх режимах розглядається комутація в другому випрямлячеві за умови $U_{K2} = E_{CA}$ (комутація тиристорів 22 і 24).

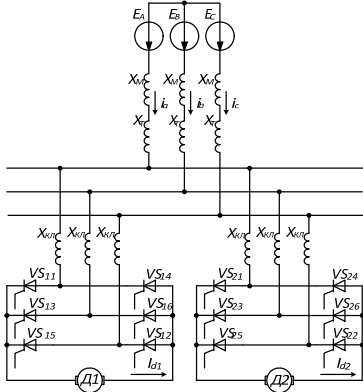


Рис. 2. Розрахункова схема перетворювачів при живленні від загального трансформатора

Під час роботи механізмів підйому і повороту екскаватора можливі три режими їх сумісної роботи:

перетворювачі механізмів комутують в одних і тих же фазах катодної чи анодної груп; [4]

комутація перетворювачів відбувається в різних фазах і різних групах; [4]

комутація перетворювачів відбувається в різних фазах однієї групи. [4]

Отже, постає питання визначення характеру зміни кута комутації в залежності від роботи в одному з трьох режимів сумісної роботи та їх впливу на мережу живлення. Для виконання необхідних розрахунків необхідно скласти схему заміщення кожного режиму (рис. 3). Параметри елементів схеми заміщення дослідної ланки: $E_{длн} = 380$ (В), $X_M = 4,5 \cdot 10^{-3}$ (Ом), $X_T = 0,018$ (Ом), $X_{КЛ} = 8,5 \cdot 10^{-4}$ (Ом).

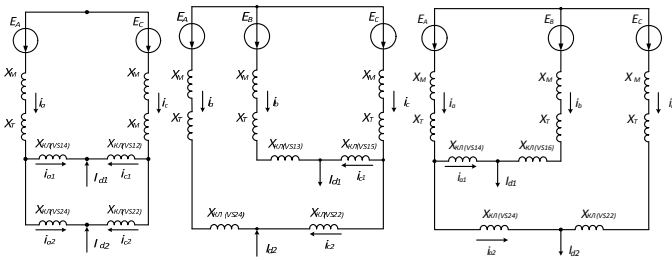


Рис. 3. Схема заміщення: а - 1-го, б - 2-го, в - 3-го режимів роботи

Під час дослідження 1-го режиму роботи розглядалася комутація тиристорів 12 і 14, 22 і 24 ($U_{K1} = U_{K2} = E_{CA}$).

Електромагнітні процеси мережі в першому режимі описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned} i_a &= i_{a1} + i_{a2}; I_{d1} = -(i_{a1} + i_{c1}); I_{d2} = -(i_{a2} + i_{c2}); \\ E_A - E_C &= X_M \frac{di_a}{d(\omega t)} + X_{K1} \frac{di_{a2}}{d(\omega t)} - X_{K1} \frac{di_{c2}}{d(\omega t)} - X_M \frac{di_c}{d(\omega t)}; \\ E_B - E_C &= X_M \frac{di_a}{d(\omega t)} + X_{K1} \frac{di_{a1}}{d(\omega t)} - X_{K1} \frac{di_{c1}}{d(\omega t)} - X_M \frac{di_c}{d(\omega t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $E_A = E_m \sin(\omega t)$, $E_B = E_m \sin(\omega t - 2\frac{\pi}{3})$, $E_C = E_m \sin(\omega t + 2\frac{\pi}{3})$ - електрорушійна сила мережі живлення; $E_m = \frac{5\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$ - амплітуда діючого значення фазної напруги мережі живлення; t - поточне значення часу; ω - частота мережі живлення; i_{a1} , i_{a2} - миттєві значення струму короткого замикання відповідно першого і другого перетворювачів; $X_M = X_M + X_T$ - сумарний індуктивний опір фази мережі живлення і трансформатора.

Розв'язок (1) дає

$$\frac{di_{a1}}{d(\omega t)} = \frac{di_{a2}}{d(\omega t)} = -\frac{E_C - E_A}{2(2X_M + X_{K1})} = -\frac{E_m \sin(\frac{2\pi}{3} + \omega t) - E_m \sin(\omega t)}{2(2X_M + X_{K1})}$$

Значення кута комутації другого випрямляча

$$\gamma_2 = \frac{5\pi}{6} - \alpha_2 - \arccos\left(\frac{1}{2}\right) + \arcsin\left[\frac{3E_m \sin(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2) + 4\sqrt{3}I_{d2}(X_{K1} + 2X_M) + 3\sqrt{3}E_m \cos(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2)}{6E_m}\right]$$

Графіки $\gamma_2 = f(\alpha_2)$ - для сумісної роботи перетворювачів (штрихова лінія) і $\gamma_{02} = f(\alpha_2)$ - для самостійної роботи перетворювача (суцільна лінія) побудовані за різних значень струмів навантаження (рис. 4,а) дозволяють зробити висновок, що за режиму сумісної роботи перетворювачів робоча зона регулювання менша ніж для тих же параметрів перетворювача за режиму самостійної роботи і зменшується з ростом струму навантаження, кут комутації збільшується, що негативно вплине на інші навантаження, що працюють від цієї мережі.

Під час дослідження 2-го режиму роботи розглядалася комутація тиристорів 13 і 15, 22 і 24 ($U_{K1} = E_{BC}$).

Електромагнітні процеси мережі в другому режимі описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned}
 i_c &= i_{c1} + i_{c2}; \quad i_{d1} = i_b + i_{c1}; \quad i_{d2} = -(i_a + i_{c2}); \\
 E_A - E_C &= X_2 \frac{di_a}{d(\omega t)} + X_{KL} \frac{di_{d1}}{d(\omega t)} - X_{KL} \frac{di_{d2}}{d(\omega t)} - X_2 \frac{di_c}{d(\omega t)}; \\
 E_B - E_C &= X_2 \frac{di_b}{d(\omega t)} + X_{KL} \frac{di_b}{d(\omega t)} - X_{KL} \frac{di_{c1}}{d(\omega t)} - X_2 \frac{di_c}{d(\omega t)}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

У результаті розв'язку системи рівнянь (2)

$$\frac{di_a}{d(\omega t)} = \frac{3U_m X_{KL} \sin(\omega t) + 3U_m X_2 \sin(\omega t) - \sqrt{3} U_m X_{KL} \cos(\omega t)}{4X_{KL}^2 + 8X_2 X_{KL} + 3X_2^2},$$

де i_a, i_b – миттєві значення струму навантаження відповідно 2-го і 1-го перетворювачів.

Рівняння визначення кута комутації другого перетворювача в другому режимі

$$\begin{aligned}
 \gamma_2 &= \frac{5\pi}{6} - \alpha_2 + \arcsin \left[\frac{\sqrt{3} I_{d2} (4X_{KL}^2 + 8X_{KL} X_2 + 3X_2^2)}{3 \sqrt{E_m^2 X_{KL}^2 + \frac{(3E_m X_{KL} + 3E_m X_2)^2}{3}}} + \right. \\
 &\quad \left. + 3E_m X_2 \cos\left(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2\right) + \sqrt{3} E_m X_{KL} \sin\left(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2\right) \right] - \arccos \left(\frac{E_m X_{KL}}{\sqrt{E_m^2 X_{KL}^2 + \frac{(3E_m X_{KL} + 3E_m X_2)^2}{3}}} \right).
 \end{aligned}$$

Графіки (рис. 4б) побудовані за аналогією до першого режиму і дозволяють зробити висновок, що за режиму сумісної роботи перетворювачів робоча зона регулювання менша ніж для тих же параметрів перетворювача за режиму самостійної роботи і зменшується з ростом струму навантаження. Аналіз графіка розпочинається з 60° оскільки режим сумісної комутації в такому режимі відбуватиметься за $\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{\pi}{3}$.

Під час дослідження 3-го режиму роботи розглядалася комутація тиристорів 14 і 16, 22 і 24 ($U_{K1} = E_{AB}$).

Електромагнітні процеси мережі в другому режимі описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_{a1} + i_{a2}; \quad i_{d1} = i_{a1} + i_b; \quad i_{d2} = i_{a2} + i_c; \\
 E_A - E_C &= X_2 \frac{di_a}{d(\omega t)} + X_{KL} \frac{di_{d1}}{d(\omega t)} - X_{KL} \frac{di_{d2}}{d(\omega t)} - X_2 \frac{di_c}{d(\omega t)}; \\
 E_B - E_C &= X_2 \frac{di_b}{d(\omega t)} + X_{KL} \frac{di_b}{d(\omega t)} - X_{KL} \frac{di_{c1}}{d(\omega t)} - X_2 \frac{di_c}{d(\omega t)}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

У результаті розв'язку (3)

$$\frac{di_c}{d(\omega t)} = \frac{(E_C - E_B)B - (E_A - E_C)}{(2X_{KL} + 3X_2)},$$

де $B = \frac{X_2}{X_2 + 2X_{KL}}$; i_b, i_c – миттєві значення струму навантаження відповідно 1 і 2 перетворювачів.

Значення кута комутації другого випрямляча

$$\begin{aligned}
 \gamma_2 &= \frac{5\pi}{6} - \alpha_2 + \arcsin \left[\frac{4I_{d2} X_{KL} + 6I_{d2} X_2 + 3E_m \cos\left(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2\right) + \sqrt{3} E_m \sin\left(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2\right)}{\sqrt{12E_m^2 B^2 + 12E_m^2 B + 12E_m^2}} \right] \\
 &\quad + \frac{2\sqrt{3} E_m B \sin\left(\frac{7\pi}{6} + \alpha_2\right)}{\sqrt{12E_m^2 B^2 + 12E_m^2 B + 12E_m^2}} - \arccos \left(\frac{\sqrt{3} E_m - 2\sqrt{3} E_m B}{\sqrt{12E_m^2 B^2 + 12E_m^2 B + 12E_m^2}} \right).
 \end{aligned}$$

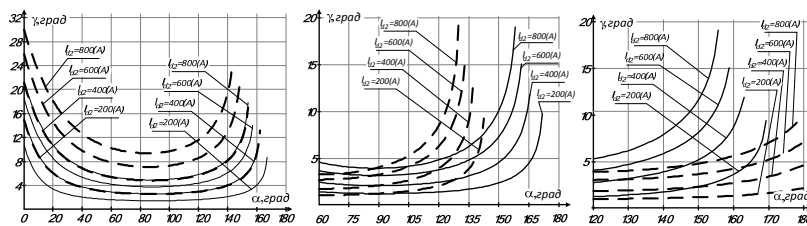


Рис. 4. Залежність $\gamma_2 = f(\alpha_2)$ для різних I_{d2} відповідно в 1-му a ; 2-му b і 3-му c режимах роботи

Графіки (рис. 4в) побудовані за аналогією до першого режиму і дозволяють зробити ви-

сновок, що за режиму сумісної роботи робоча зона регулювання більша ніж при тих же параметрах перетворювача за режиму самостійної роботи і є максимальною ($0-180^\circ$) незалежно від струму навантаження, а кут комутації на всьому діапазоні регулювання менший ніж за режиму самостійної роботи. Графік розпочинається зі 120° оскільки режим сумісної комутації в даному режимі буде відбуватися для $\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{2\pi}{3}$.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Під час дослідження режимів взаємовпливу перетворювачів та їх сумісного впливу на мережу живлення було виділено три можливі режими сумісної комутації, які були описані математичними методами. Розрахункові співвідношення дозволили зробити аналіз кожного режиму. Як виявилось, робота в кожному режимі суттєво різниться. Так, було визначено, що характерною особливістю роботи перетворювачів у

першому режимі є зменшення робочої зони керування і затягування кута комутації на всьому проміжку керування; характерною особливістю другого режиму є також зменшення робочої зони керування, але різниця у тому, що кут комутації буде мати зону сприятливої комутації і зону її затягування, що в порівнянні з першим режимом буде більш сприятливо. Характерною особливістю третього режиму, на відміну від першого і другого режимів, є збільшення робочої зони керування, і зона сприятливої комутації буде на всьому діапазоні керування.

Список літератури

1. Справочник по преобразовательной технике / [Под ред. **И.М. Чиженко**]. – К. : Техника, 1978. – 445 с.
2. **Шипило В.П.** Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть / **В.П. Шипило** // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1970. – №1. – С. 5–10.
3. **Ващенко А.П.** Взаимное влияние тиристорных преобразователей мощных электроприводов через общую сеть «Тяжпромэлектропроект». – М. : Энергия, 1970. – № 7. – С. 3–9.
4. **Аннопольский Ю.Ф.** Особенности работы управляемых выпрямителей при групповом питании / **Ю.Ф. Аннопольский, И.И. Левитан** // Электротехника. – 1976. – №9. – С. 40–43.
5. **Синолицый А.Ф.** Электромагнитная совместимость в системах питания и управления группой турбомеханизмов / **А.Ф. Синолицый, В.А. Кольсун** // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, 2005 р. – №3(32). – С. 46–50.

Рукопис подано до редакції 21.03.13

УДК 621.317.41:537.812

С.Т. ТОЛМАЧЕВ*, д-р техн. наук, проф., С.Л. БОНДАРЕВСКИЙ, ст. преподаватель, Д.Л. ЮХИМОВИЧ, ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ТЕНЗОР ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДВОЯКОПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЛЫХ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ

На основе метода мультиполей для двух типов решеток - простой орторомбической и моноклинной - с взаимно-перпендикулярными осями симметрии получены явные формулы для тензора приведенной проницаемости двояко-периодической системы полых круговых цилиндров с произвольными магнитными проницаемостями областей.

Расчет приведенных свойств упорядоченной гетерогенной среды (УГС) начиная с классической работы Дж. Релея [1] постоянно был объектом пристального внимания многих исследователей [2-4]. Однако в обширной библиографии по данному вопросу большинство работ посвящено УГС со сплошными круговыми цилиндрами. Обобщение метода мультиполей на случай произвольной решетки с полыми круговыми цилиндрами впервые дано в статьях авторов [5,6].

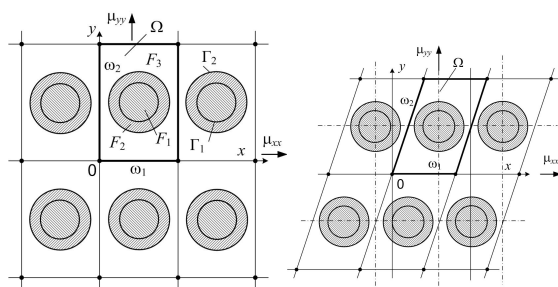


Рис. 1. Решетки W_1 - а и W_2 - б со взаимно-ортогональными осями симметрии

В данной статье, основанной в основном на материалах статей [5,6], рассмотрена задача приведения указанной УГС для двух важных случаев решетки W - простой орторомбической W_1 и моноклинной W_2 , а именно: $W_1 \rightarrow \omega_1=c, \omega_2=jd, \tau=jd/c$ и $W_2 \rightarrow \omega_1=c, \omega_2=c/2+jd, \tau=1/2+jd/c$ (рис. 1).

Важными частными случаями решеток W_1 и W_2 являются квадратная ($\tau=j$) и гексагональная ($\tau=e^{j\pi/3}$). Выбор указанных структур обусловлен тем, что в силу симметрии в них главные оси тензора магнитной проницаемости очевидны и совпадают с направлениями осей x и y . В общем случае косоугольной решетки эта задача требует специального рассмотрения.

Обозначим через $H_0=H_{0x}+jH_{0y}$ напряжённость внешнего поля, а через μ_1, μ_2, μ_3 - относительные магнитные проницаемости областей F_1, F_2 и F_3 , причем примем $\mu_3=1$. Компоненты тензора приведенной магнитной проницаемости выражаются через дипольный момент цилиндров $\wp = \wp_x + j\wp_y$:

$$\wp = \int_F J(\xi) d\tau_\xi = \int_{F_1} J(\xi) d\tau_\xi + \int_{F_2} J(\xi) d\tau_\xi = \wp_x + j\wp_y. \quad (1)$$

При $\mu=\text{const}$ двумерные интегралы выражаются через контурные [7]