

УДК 621.314

А.Ю. Букарос, аспірант, науковий керівник О.А. Онищенко, д.т.н., професор  
Одеська державна академія холоду, м. Одеса, Україна

### **КОРЕКТОР КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

*Запропонований новий метод корекції коефіцієнту потужності вторинних джерел живлення частотно-регульованих електроприводів. Проведено порівняння енергетичних характеристик пропонованого коректора коефіцієнту потужності з існуючими технічними рішеннями.*

*Предложен новый метод коррекции коэффициента мощности вторичных источников питания частотно-регулируемых электроприводов. Проведено сравнение энергетических характеристик предлагаемого корректора коэффициента мощности с существующими техническими решениями.*

*The new method of the power factor correction of the frequency-regulated electric drives secondary power supply is offered. Comparing power descriptions of the offered power factor corrector is conducted to the existent technical decisions.*

При включенні в промислову електричну мережу пристроїв з реактивною складовою навантаження (газорозрядні лампи, імпульсні джерела живлення, випрямлячі, керовані електроприводи тощо) відбувається викривлення форми та поява вищих гармонік споживаного струму таких пристроїв. Це призводить до проблеми електромагнітної сумісності електричного обладнання й мережі, яка характеризується значенням коефіцієнту нелінійних викривлень (КНВ) [3]. Крім цього наявність реактивної складової додатково підвищує величину споживаного струму та знижує коефіцієнт потужності навантаження [3].

Проблема найбільш повного використання електричної енергії є актуальною з моменту початку її використання. Починаючи з 1995 року, ця проблема стала ще гострішою з введенням стандарту Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) ІЕС 61000-2-3 «Електромагнітна сумісність. Границі викидів для синусоїдального струму (обладнання з вхідним струмом меншим або рівним 16 А на фазу)» [2] та введенням в дію в Україні міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97 [5] наказом №354 від 18 червня 1999 року Державного комітету України по стандартизації, метрології та сертифікації. Ці стандарти регламентують жорсткі умови електромагнітної сумісності пристроїв силової електронної техніки. Зокрема, коефіцієнт потужності всіх споживачів електричної енергії потужністю вище 300 Вт повинен наближатися до одиниці, а значення КНВ напруги електричної мережі не повинно перевищувати 12%. Невиконання цих вимог світовими виробниками силової електронної техніки спричиняє не тільки відсутність конкурентоспроможності, а й в деяких випадках неможливість продажу своєї продукції на світовому ринку. Вказані стандарти постійно вдосконалюються та доповнюються, при чому вимоги до електромагнітної сумісності становляться більш жорсткими.

Слід зазначити, що значну частину споживачів електроенергії і ринку силової електронної техніки складають регульовані електроприводи промислових машин і механізмів – роботів, станків, насосів, вентиляторів, компресорів тощо. Серед них постійно поширюється доля електроприводів змінного струму з частотним регулюванням швидкості обертання. Отже, в світі останніх стандартів МЕК питання підвищення коефіцієнту потужності й електромагнітної сумісності частотно-регульованих електроприводів являється

актуальним завданням.

Для вирішення задачі підвищення коефіцієнту потужності й електромагнітної сумісності електричних споживачів виробниками електричного обладнання пропонується кілька технічних рішень. Історично першим з цих рішень і найбільш простим в реалізації є пасивний метод корекції коефіцієнту потужності [1]. Проте ефективна робота пасивного коректора коефіцієнту потужності можлива лише при чітко вираженій незмінній індуктивної складової навантаження (люмінесцентні лампи, електроприводи конвеєрів). Такий коректор має порівняно великі габарити та масу, невеликий коефіцієнт потужності (не більше 0,95) і не вирішує питання електромагнітної сумісності імпульсних пристроїв. Для частотно-регульованих електроприводів зі змінним навантаженням, які в своєму складі мають інвертор напруги, працюючий на частоті 20-50 кГц, пасивний метод корекції не придатний, оскільки не зможе підтримувати високі значення коефіцієнту потужності і відповідно низькі значення КНВ.

Розвиток силової електроніки та поява в останні три десятиріччя повністю керованих електронних силових приладів – IGBT та MOSFET транзисторів призвело до можливості технічної реалізації імпульсного способу корекції коефіцієнта потужності [1] з високими енергетичними показниками, які повністю відповідають останнім вимогам МЕК. Конструктивні та енергетичні показники імпульсних коректорів в теперішній час постійно удосконалюються.

Метою статті є описання нового метода імпульсної корекції коефіцієнту потужності та порівняння його характеристик з існуючими технічними рішеннями.

Побудова імпульсних коректорів коефіцієнту потужності (ККП) можлива з використанням двох топологій перетворювачів напруги: чоперної – на основі імпульсного перетворювача напруги, що знижує, та бустерної – на основі імпульсного перетворювача напруги, що підвищує. Оскільки чоперний перетворювач в принципі не спроможний виробляти вихідну напругу більшу за вхідну, то його область застосування обмежена вторинними джерелами живлення електронних приладів та електроприводами постійного струму. Обидві топології передбачають два можливих режиму роботи коректора. Режим пульсуючого струму, який характеризується спаданням струму індуктивності до нуля на кожному періоді керуючого сигналу, може ефективно застосовуватися лише для малопотужних споживачів з причини високих значень пульсацій споживаного струму та електромагнітних завад. Тому в даній роботі будемо розглядати ККП в складі бустерного перетворювача напруги, працюючий в режимі неперервного струму.

Для класу ККП, що розглядається, існують два принципово різних технічних рішення. Одне з них передбачає використання в схемі стабілізації вихідної напруги аналогового множника напруги, який керує порогом відкриття ключового елемента коректора [1]. Наявність в схемі множника напруги призводить до суттєвого ускладнення структури коректора і появи викривлень споживаного струму в інтервалах часу, близьких до переходу напруги мережі через нульове значення. Це пов'язано з інструментальними викривленнями в аналогових множниках при перемножуванні малих величин, які прямують до нульового значення. Незважаючи на вказані недоліки, цей спосіб корекції коефіцієнту потужності широко використовується світовими виробниками силової електроніки і буде розглядатися в даній статті в порівнянні з іншими технічними рішеннями.

Друге технічне рішення корекції коефіцієнту потужності базується на запатентованій компанією International Rectifier технології «керування в одному циклі». Дана технологія передбачає використання в схемі стабілізації вихідної напруги інтегратора зі скиданням на кожному такті керуючого сигналу [4]. Сигнал розбалансу вихідної напруги керує

коефіцієнтом підсилення інтегратора, який в свою чергу керує порогом відкриття ключового елемента коректора, здійснюючи стабілізацію вихідної напруги. Такий підхід призводить до значного спрощення структури ККП. Проте він має суттєвий недолік: відсутність гармонійного сигналу, що задає, супроводжується появою низькочастотних викривлень форми струму. Це призводить до зниження коефіцієнту потужності особливо при значному змінюванні навантаження, що має місце в частотно-регульованих електроприводах. Крім цього, відносно висока частота комутації ключового елемента (100 кГц) підвищує комутаційні втрати і висуває більш жорсткі вимоги до ключового транзистора.

В основу пропонованого авторами методу корекції коефіцієнту потужності поставлено задачу зменшити викривлення синусоїдальної форми споживаного струму, спростити структуру, знизити собівартість та підвищити ККД частотно-регульованих електроприводів з ККП за рахунок зміни структури керуючої схеми коректора. Поставлена задача вирішена в конструкції ККП для частотно-регульованого електроприводу, що зображена на рисунку 1, де позначено: 1 – діодний міст; 2 – дросель; 3 – діод, що відсікає; 4 – перший вихідний вивід схеми; 5 – другий вихідний вивід схеми; 6 – фільтруючий конденсатор; 7 – ключовий транзистор; 8 – датчик вихідної напруги; 9 – датчик вхідної напруги; 10 – датчик струму дроселя; 11 – підсилювач похибки вихідної напруги; 12 – тактовий генератор синусоїдального сигналу; 13 – схема визначення нульового значення вхідної напруги; 14 – суматор; 15 – компаратор; 16 – таймер; 17 – D-тригер; 18 – драйвер ключового транзистора.

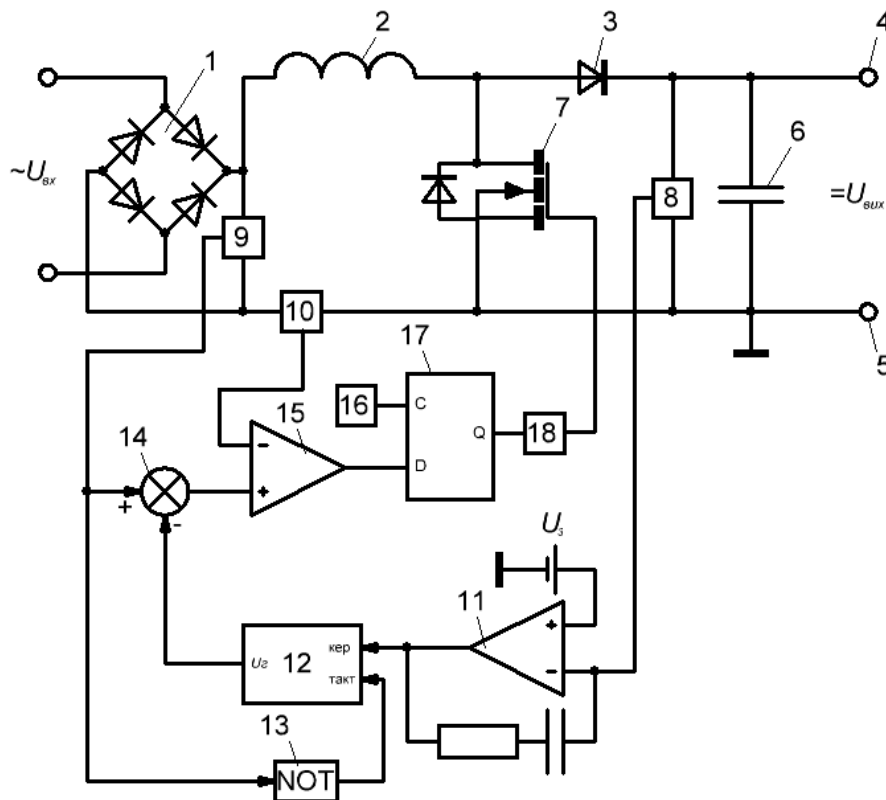


Рисунок 1 – Структурно-принципова схема ККП

Роботу пропонованого коректора коефіцієнта потужності пояснює рисунок 2, де позначено: 21 – сигнал з виходу підсилювача похибки вихідної напруги 11, пропорційний необхідній зміні амплітуди струму дроселя, 22 – вихідний сигнал генератора 12, 23 – сигнал

датчика вхідної напруги 9, 24 – сигнал на виході суматора 14, 25 – сигнал датчика струму дроселя.

Працює коректор коефіцієнту потужності наступним чином. Вхідна синусоїдальна напруга мережі  $U_{ex}$  перетворюється випрямлячем 1 на однополярну пульсуючу напругу, яка контролюється датчиком вхідної напруги 9. Якщо ключовий транзистор 7 відкритий, то відбувається накопичування магнітної енергії дроселем 2. При цьому струм дроселя зростає практично лінійно за законом  $I = U_e \cdot t / L$ , де  $U_e$  – напруга на виході випрямляча 1,  $t$  – час,  $L$  – індуктивність дроселя. Якщо ключовий транзистор 7 закритий, то дросель 2 віддає накопичувану енергію в навантаження, і струм дроселя спадає практично лінійно за законом  $I = I_{max} - (U_{вих} - U_e) \cdot t / L$ , де  $U_{вих}$  – вихідна напруга коректора,  $I_{max}$  – максимальний струм дроселя. При цьому напруга  $U_e$  підсумовується з напругою на дроселі, і напруга на вихідних виводах схеми 4, 5 зростає і може перевищувати значення  $U_{ex}$ . Фільтруючий конденсатор 6 призначений для згладжування пульсацій вихідної напруги  $U_{вих}$ , яка контролюється датчиком вихідної напруги 8. Діод 3 призначений для блокування навантаження та фільтруючого конденсатора 6 від транзистора 7 в періоди знаходження його в відкритому стані.

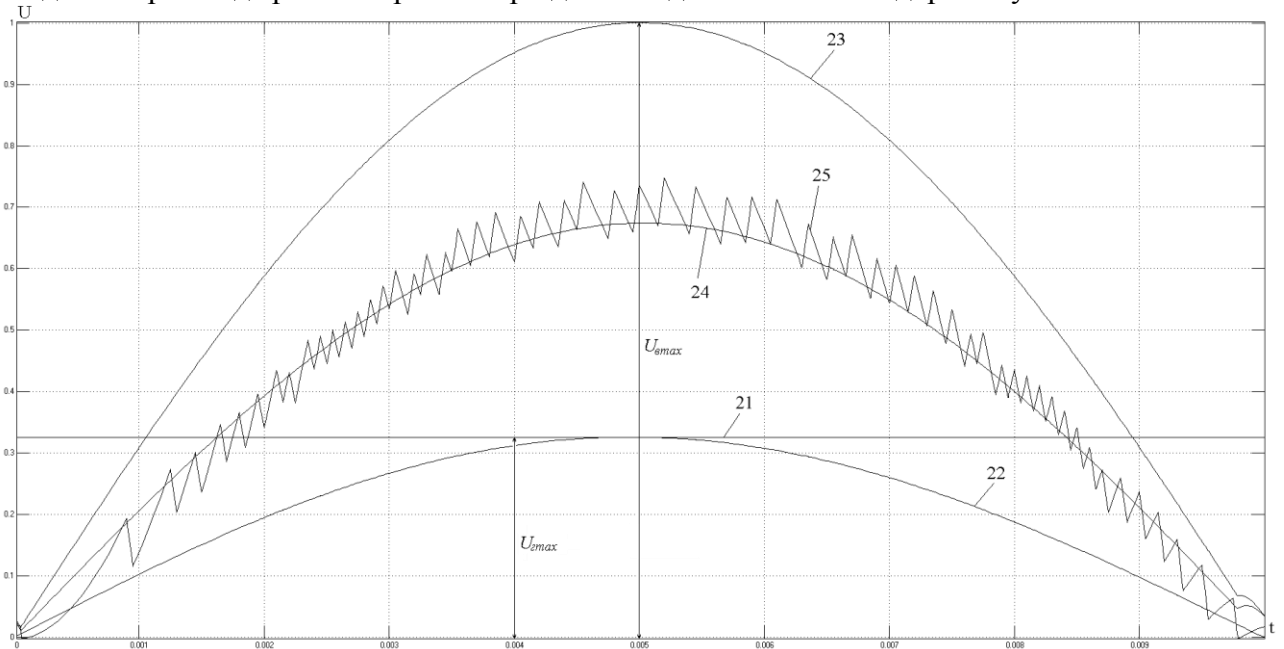


Рисунок 2 – Графіки основних сигналів елементів схеми ККП

Стабілізацію вихідної напруги при змінюванні навантаження або мережевої напруги та забезпечення синусоїдальної форми споживаного струму здійснює керуюча схема наступним чином. Сигнал з датчика вихідної напруги 8 порівнюється з величиною заданої напруги  $U_3$  підсилювачем похибки вихідної напруги 11, який формує сигнал 21 пропорційний необхідній зміні амплітуди струму дроселя, що подається на керуючий вхід генератора синусоїдальної напруги 12. Структурна схема тактового генератора синусоїдальної напруги 12 зображена на рисунку 3, де позначено: 19 – інтегратор зі скиданням вихідного сигналу, 20 – суматор.

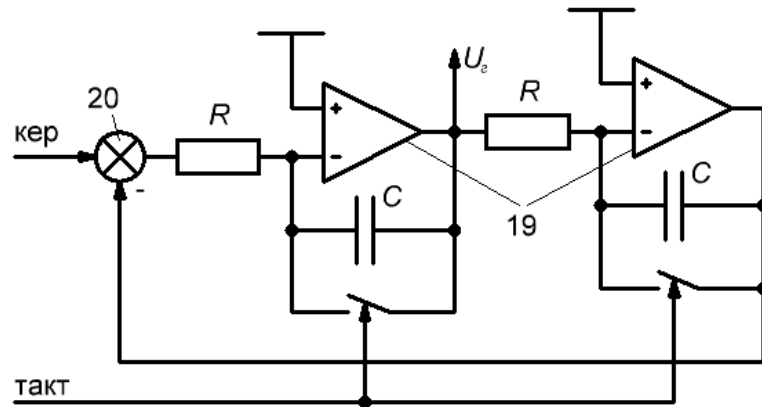


Рисунок 3 – Структурно-принципова схема тактового генератора синусоїдальної напруги

Схема уявляє собою два послідовно з'єднаних інтегратора, охоплених негативним зворотним зв'язком. Передавальна функція між виходом  $U_2$  і керуючим входом має вигляд:

$$W(p) = \frac{RC \cdot p}{(RC)^2 \cdot p^2 + 1}. \quad (1)$$

На виході передавальної функції такого виду буде формуватися синусоїдальний сигнал з кутовою частотою  $\omega = 1/RC$  і амплітудою, яка дорівнює входньому керуючому сигналу. Підбором значень  $R$  і  $C$  можна встановити необхідну частоту вихідного синусоїдального сигналу генератора 12 (50 Гц).

Таким чином на виході генератора формується сигнал похибки 22 за законом  $U_2 = U_{2max} \cdot |\sin \omega t|$ , амплітуда  $U_{2max}$  якого буде дорівнювати сигналу підсилювача похибки вихідної напруги 11, як зображено на рисунку 2. Сигнал скидання інтеграторів 19 подається логічною схемою 13 кожний раз при досягненні напруги на виході випрямляча 1 нульового значення для запуску генератора 12 синхронно з мережевою напругою і мінімізації похибки формування сигналу  $U_2$ , обумовленої інерційністю елементів генератора 12 та неточним підбором величин  $R$  і  $C$ .

Сигнал 22 генератора 12 віднімається від сигналу 23 датчика вхідної напруги суматором 14, який формує сигнал завдання струму дроселя 24 за законом  $U_{2c} = (U_{2max} - U_{2max}) \cdot |\sin \omega t|$ . Таким чином створюється негативний зворотній зв'язок по вихідній напрузі коректора коефіцієнта потужності. При будь-якій зміні вихідної напруги, за рахунок зміни сигналу завдання 24 відбувається відповідна зміна величини струму дроселя, а отже й споживаного з мережі струму, що призводить до повернення значення вихідної напруги  $U_{вих}$  до заданого  $U_2$  та її стабілізації.

Формування синусоїдальної форми мережевого струму здійснюється компаратором 15, який порівнює сигнал завдання струму дроселя 24 з сигналом 25 датчика струму дроселя 10 і формує керуючі імпульси, що за допомогою D-тригера 17 та драйверу 18 подаються на затвор ключового транзистора 7. Зміна стану D-тригера 17 відбувається в моменти часу надходження імпульсів з таймеру 16, при цьому стан D-тригера може як змінитися, так і залишитися попереднім в залежності від сигналу з компаратора 15. Таким чином середня частота комутації ключового транзистора 7 буде нижче тактової частоти таймеру 16. В результаті роботи керуючої схеми ключовий транзистор відкривається при зниженні та закривається при перевищуванні значення струму дроселя відносно заданого 24. При цьому струм дроселя, а отже й споживаний з мережі струм, буде практично повторювати форму

мережевої напруги, і коефіцієнт потужності всієї схеми буде досягати значення 0,98 – 0,998.

Порівняння запропонованого способу корекції коефіцієнту потужності з двома розглянутими технічними рішеннями в класі ККП, побудованими на основі бустерної топології та працюючими в режимі неперервного струму індуктивності, було проведено за допомогою чисельного моделювання в середовищі Matlab 2011. З метою імітації змінного навантаження частотно-регульованого електроприводу дослідження проводилося для трьох значень навантаження – номінального (100 Вт), збільшеного та зменшеного в 3 рази відповідно. Для оцінки і порівняння якості споживання електроенергії використовувалися наступні величини: коефіцієнт корисної дії –  $\eta$ , коефіцієнт потужності ККП –  $\cos\phi$ , КНВ (таблиця 1).

Таблиця 1 – Показники енергетичної ефективності варіантів ККП

Показник енергетичної ефективності	Навантаження	ККП з множником напруги	ККП на основі технології «керування в одному циклі»	Запропонований ККП з тактовим генератором синусоїдального сигналу
$\eta$	зменшене в 3 рази	0,914	0,929	0,948
	номінальне	0,96	0,955	0,966
	збільшене в 3 рази	0,97	0,959	0,974
$\cos\phi$	зменшене в 3 рази	0,996	0,981	0,987
	номінальне	0,998	0,999	0,998
	збільшене в 3 рази	0,94	0,999	0,999
КНВ, %	зменшене в 3 рази	4,75	14,04	12,57
	номінальне	3,16	4,04	4,79
	збільшене в 3 рази	2,97	1,65	1,14

Аналіз результатів, наведених в таблиці 1, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Запропонований коректор коефіцієнту потужності в порівнянні з коректорами, побудованими на основі технології «керування в одному циклі», має більш високий ККД за рахунок зниження середньої частоти комутації ключового елемента і, як наслідок, зменшення комутаційних втрат в ньому.

2. В порівнянні з коректорами коефіцієнту потужності з множником напруги запропонований коректор також має більш високий ККД за рахунок спрощення схеми керування (відсутності множника напруги).

3. Більш високі значення коефіцієнту потужності запропонованого ККП в порівнянні з двома іншими варіантами при зміні навантаження спричиняються наявністю гармонійного сигналу, що задає та відсутністю інструментальних викривлень множника напруги.

4. Крім цього зниження середньої частоти комутації ключового транзистора в запропонованому ККП підвищує надійність схеми, збільшує термін служби за рахунок зниження середньої робочої температури пристрою.

#### Список використаної літератури

1. Дмитриков В.Ф., Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. / Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. – М.: Радио и связь; Горячая линия – Теком, 2005. – 424 с.

2. Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу) (ІЕС 61000-3-2:2005, ІДТ): ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2008. – [Чинний від 01-12-2008]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 10 с.

3. Климов В.П. Компенсаторы реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения / В. Климов, Ю. Карпиленко, В. Смирнов // Силовая электроника. – 2008. – № 3. – С. 108-112.

4. Пат. WO 2004/059414 A1 Міжнародний, МПК G 05 F 1/10, 1/40. One cycle control continuous conduction mode PFC boost converter integrated circuit with integrated power switch and boost converter / Athari F.; заявник та патентовласник International Rectifier Corporation. – № PCT/US2003/040001; заявл. 15.12.03; опубл. 15.07.04.

5. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (ГОСТ 13109-97): ГОСТ 13109-97. – [Чинний від 01-08-1999]. – К.: Державний комітет України по стандартизації, метрології та сертифікації, 1999. – 34 с.