

УДК 621.314

**Запропонований новий метод корекції коефіцієнту потужності вторинних джерел живлення частотно-регульованих електроприводів. Проведено порівняння енергетичних характеристик запропонованого коректора коефіцієнту потужності з існуючими технічними рішеннями**  
**Ключові слова: метод корекції, коефіцієнт потужності, електропривод**

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

**Ключевые слова: метод коррекции, коэффициент мощности, электропривод**

**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**

**Keywords: correction method, power factor, electric drive**

# КОРЕКТОР КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЧАСТОТНО- РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

**А. Ю. Букарос**

Аспірант, асистент

Кафедра електротехніки та електронних пристроїв

Одеська державна академія холоду

вул. Дворянська, 1/3, г. Одеса, Україна, 65082

Контактний тел.: 063-894-38-71

E-mail: bucaros@mail.ru

## 1. Вступ

При включенні в промислово 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].

## 2. Аналіз технічних рішень та постановка проблеми

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 Держав-

ного 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 електрич-

них 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 індуктивній складовій 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 силових 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 перемноженні малих величин, які прямують до нульового значення. Незважаючи на вказані недоліки, цей спосіб корекції коефіцієнту потужності широко використо-

вується світовими виробниками силових 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 низько-частотних 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.

### 3. Мета й завдання дослідження

Метою дослідження є розробка нового конкурентоспроможного метода корекції коефіцієнту потужності. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішення кілька завдань: 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.

### 4. Описання пропонованого коректора коефіцієнту потужності

Поставлені завдання вирішені 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.

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  $U_{вх}$  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  $I = U_b \cdot t / L$ , де  $U_b$  – напруга на виході випрямляча 1,  $t$  – час,  $L$  – індуктивність дроселя. Якщо ключовий транзистор 7 закритий, то дросель 2 видає накопичувану енергію в навантаження, і струм дроселя спадає практично лінійно за законом  $I = I_{max} \cdot (U_{вих} - U_b) / L$ , де  $U_{вих}$  – вихідна напруга коректора,  $I_{max}$  – максимальний струм дроселя. При цьому напруга  $U_{вих}$  підсумовується з напругою на дроселі, і напруга на вихідних виводах схеми 4, 5 зростає і може перевищувати значення  $U_{вих}$ . 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.

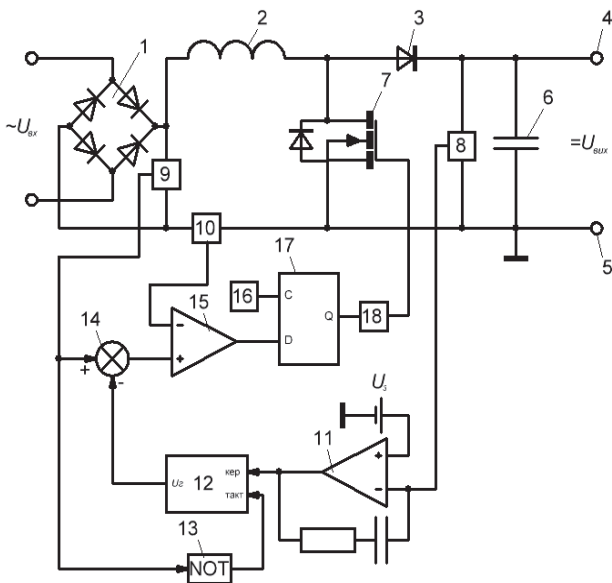


Рис. 1. Структурно-принципова схема ККП

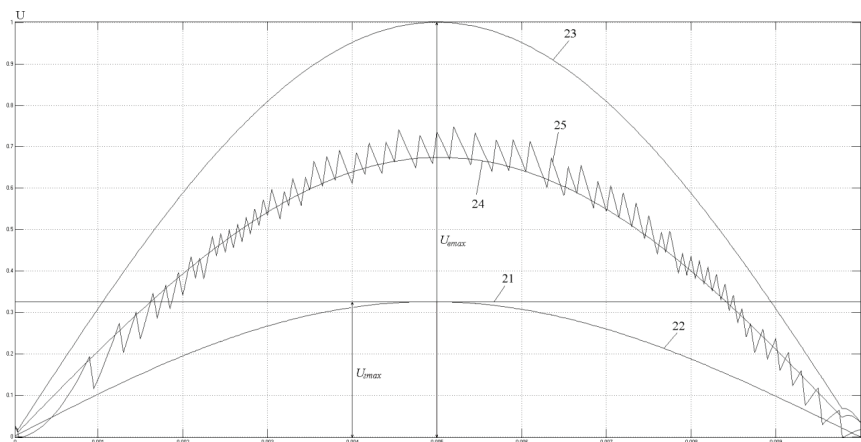


Рис. 2. Графіки основних сигналів елементів схеми ККП

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  $U_s$  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.

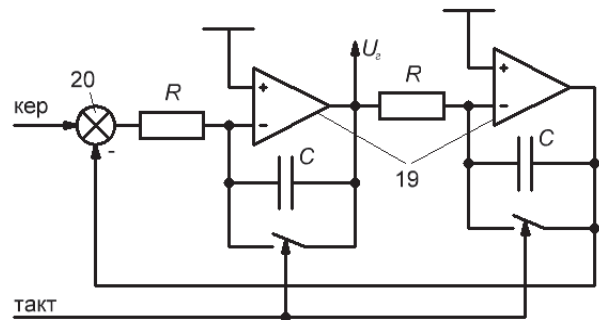


Рис. 3. Структурно-принципова схема тактового генератора синусоїдальної напруги

Схема уявляє собою два послідовно з'єднаних інтегратора, охоплених негативним зворотним зв'язком. Передавальна функція між виходом  $U_b$  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 вхідному 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  $U_r = U_{rmax} \cdot |\sin \omega t|$ , амплітуда  $U_{rmax}$  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  $U_r$ , 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  $U_{ac} = (U_{вmax} - U_{rmax}) \cdot |\sin \omega t|$ . Та-

ким 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  $U_{\text{вих}}$  до заданого  $U_3$  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.

### 5. Чисельне моделювання й порівняльний аналіз

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 –  $\cos\varphi$ , КНВ (таблиця 1).

### 6. Висновки

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

1. Пропонований 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 множителем 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.

Таблиця 1

Показники енергетичної ефективності та якості варіантів ККП

Показник енергетичної ефективності та якості	Навантаження	ККП з множителем напруги	ККП на основі технології «керування в одному циклі»	Пропонований 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
$\cos\varphi$	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

### Література

1. Дмитриков В.Ф., Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств [Текст] / 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) [Текст]: 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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) [Текст]: ГОСТ 13109-97. – [Чинний від 01-08-1999]. – К.: Державний комітет України по стандартизації, метрології та сертифікації, 1999. – 34 с.

**Мета роботи - розробка та оптимізація загальної схеми процесу кваліфікації обладнання. В роботі запропонована оптимізована схема процесу та розглянуті завдання, які необхідно вирішити при оцінці кваліфікації. Запропоновано методи їх вирішення**

**Ключові слова: кваліфікація, статус кваліфікації, кваліфікаційні випробування, ефекти старіння**

**Цель работы – разработка и оптимизация общей схемы процесса квалификации оборудования. В работе предложена оптимизированная схема процесса и рассмотрены задачи, которые необходимо решить при оценке квалификации. Предложены методы их решения**

**Ключевые слова: квалификация, статус квалификации, квалификационные испытания, эффекты старения**

**Purpose - Development and optimization of the overall scheme of equipment qualification. The paper presents an optimized scheme of the process and discussed the main aspects of qualification. The decision methods are offered.**

**Key words: qualification, qualification state, qualification test, the effects of aging**

#### Общие положения

Безопасность блока определяется надежностью и работоспособностью оборудования систем безопасности. Известно множество различных процедур, которые используются на АЭС для подтверждения его работоспособности (периодические испытания и замена, система контроля состояния элементов систем, важных для безопасности, (СВБ), система управления старением). Использование в рамках одного блока всех этих процедур с учетом их взаимосвязи – очень длительный, громоздкий и технически сложный процесс, упростить который можно введением единой системы квалификации технологического оборудования.

Квалификация оборудования (КО) – подтверждение и поддержание показателей и технических характеристик оборудования с целью обеспечения его работоспособности в «жестких» условиях окружающей среды и/или при сейсмических воздействиях.

Проведение КО рекомендовано МАГАТЭ [1] и должно быть одним из важнейших направлений дея-

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ АЭС УКРАИНЫ

УДК: 621.311.25:621.039

**И. А. Остапенко**

Студент\*

Контактный тел.: 066-952-33-98

E-mail: groz-1@yandex.ru

**Д. В. Горанчук**

Студент\*

Контактный тел.: 097-699-35-70

E-mail: carreraua@bigmir.net

**Д. Н. Косяк**

Студент\*

Контактный тел.: 063-227-16-31

E-mail: ishtory@gmail.com

\*Кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, 03056

тельности по обеспечению необходимого уровня безопасности энергоблоков АЭС.

Основной целью квалификации является установление (определение) квалификационного срока оборудования – периода времени, на протяжении которого оборудование будет гарантированно выполнять возложенные на него функции с учетом влияния эффектов старения.

Рекомендации по проведению процесса КО приведены в стандартах МАГАТЭ [2]. Предложена модернизированная общая структурная схема процесса оценки квалификации оборудования (рис. 1). В данной схеме процесс КО включает в себя три основных этапа:

- Подготовка исходных данных;
- Оценка состояния квалификации;
- Разработка методов повышения квалификации.

#### 1. Подготовка исходных данных

В общем случае, квалификация выполняется для всего оборудования. Однако это приводит к значи-