УДК 621.341.572

О. А. Жуков, канд. техн. наук, доц.; Д. П. Проценко, канд. техн. наук;
С. М. Бойко, канд. техн. наук, доц.; А. М. Коваль, канд. техн. наук; Г. Ю. Риков

ДО ПИТАННЯ СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ СПОЖИВАНОГО СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

У статті наведено результати експериментальних досліджень з метою аналізу характеру та ступеня впливу гармонік, які виникають під час роботи сучасних частотних перетворювачів, що застосовуються у промислових електроприводах. Для проведення досліджень була використана експериментальна установка, основу якої становить однофазний перетворювач частоти Altivar 31. Дослідження було проведено для декількох режимів роботи, зокрема холостий хід, номінальне навантаження та перевантаження на 25 %. Для аналізу отриманих результатів використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення Mathcad 14, що дозволило отримати наочне представлення у вигляді часових діаграм струму та лінійної напруги.

Отримані експериментальні дані дали змогу визначити спектральний склад вхідного струму перетворювача, який складається виключно з непарних гармонік, найбільший вплив серед яких мають гармоніки низьких порядків, зокрема 5-та та 7-ма. Встановлено закономірності зміни коефіцієнта гармонічних спотворень струму залежно від рівня навантаження та частоти вихідної напруги перетворювача.

Встановлено, що збільшення навантаження сприяє зниженню коефіцієнта гармонічних спотворень струму, тоді як його зменшення веде до підвищення рівня спотворень. Визначено, що основною причиною спотворення струму однофазним перетворювачем частоти є робота мостового випрямляча, який є його складовою частиною, на ємнісне навантаження.

Інформація про рівень гармонічних спотворень відсутня в технічній документації перетворювачів частоти, тому одержані експериментальні дані дозволяють оцінити їх вплив на систему електропостачання під час впровадження частотних електроприводів. Запропоновано спосіб зменшення спотворення вхідного струму перетворювачів частоти шляхом введення в силову схему імпульсних коректорів коефіцієнта потужності (PFC), які на відміну від вхідних фільтрів мають менші габарити та вартість. Це дозволяє зменшити втрати електроенергії, стабілізувати параметри електропостачання, підвищити загальну енергоефективність і надійність роботи системи.

Результати дослідження можуть бути використані під час проєктування та модернізації промислових систем електропостачання з частотно-регульованими електроприводами.

Ключові слова: *електропривод, однофазна система електропостачання, перетворювач частоти, вищі гармоніки.*

Постановка проблеми

Електромеханічні системи електроприводу мають широке розповсюдження у різних сферах людського буття. Також електропривод є одним із потужних споживачів електричної енергії. У той же час однофазний електропривод займає не останнє місце у споживанні електричної енергії та є важливим елементом електромеханічних систем та комплексів. Між тим, використання різних пристроїв управління однофазними електроприводом можуть стати причиною зменшення якості електричної енергії в енергосистемі та зменшення ефективності споживання електричної енергії електромеханічним комплексом в цілому, що, в свою чергу, може призвести до збільшення втрат електричної енергії. [1, 2].

Сьогодні, в умовах модернізації наявних експлуатованих систем однофазного

електроприводу невеликої потужності має місце використання у якості систем керування перетворювачів частоти, які є основним силовим компонентом систем керування електроприводів на базі асинхронних та синхронних двигунів. Між тим, для мережі змінного струму, у тому числі і однофазних, перетворювачі частоти є нелінійним навантаженням. Це зумовлює те, що споживаний струм може мати складну несинусоїдну форму, гармонічний склад якого не є сталим та залежить від різних параметрів роботи електропривода, зокрема вихідної частоти, механічного навантаження на валу, рівня вхідної напруги тощо [3].

Саме тому дослідження впливу перетворювачів частоти на систему електропостачання вимагає оцінювання гармонічного складу споживаного струму перетворювачами частоти за різних експлуатаційних умов, яке є актуальною задачею та спрямоване на покращення показників якості електричної енергії в однофазній мережі та підвищення ефективності електроспоживання.

Аналіз публікацій за темою дослідження

Велика кількість досліджень в галузі електроприводу направлена на покращення систем керування та енергетичних характеристик самого електропривода [5 – 7]. У них перетворювач частоти розглядається як засіб для регулювання швидкості обертання двигуна електропривода, що дозволяє його використовувати як основу для побудови різноманітних автоматизованих електромеханічних систем.

Також, деякі роботи присвячені питанням функціонування електропривода методами математичного та імітаційного моделювання як складової частини електромеханічного комплексу [8 – 11]. З поміж іншого в роботі [8] запропоновано комп’ютерну модель перетворювачів частоти, які використовуються у електроприводі в середовищі ППП Matlab.

У роботі [13] здійснено експериментальні дослідження гармонічного складу несинусоїдних струмів та напруг в пристроях силової перетворювальної техніки, зокрема в трифазному однотактному керованому випрямлячі за різних режимів його роботи, однак основна увага присвячена дослідженню його впливу на точність вимірювань цих величин.

Між тим, недостатньо проведено досліджень гармонічного складу споживаного струму електричних приводів з частотним регулюванням в залежності від різних параметрів роботи, а також його впливу на систему електропостачання, зокрема в однофазних мережах.

Таким чином, **метою роботи** є оцінювання гармонічного складу споживаного струму однофазних перетворювачів частоти шляхом експериментальних досліджень, що створює передумови для вибору ефективних способів зниження гармонічних спотворень.

Виклад основного матеріалу

Більшість перетворювачів частоти з живленням від однофазної мережі, що використовуються в електричних приводах та відповідно виготовляються виробниками у якості комплектних пристроїв, виконані за структурною схемою, наведеною на рис. 1 [14 – 16]. Силове коло таких пристроїв складається з випрямляча, фільтра та автономного інвертора напруги.

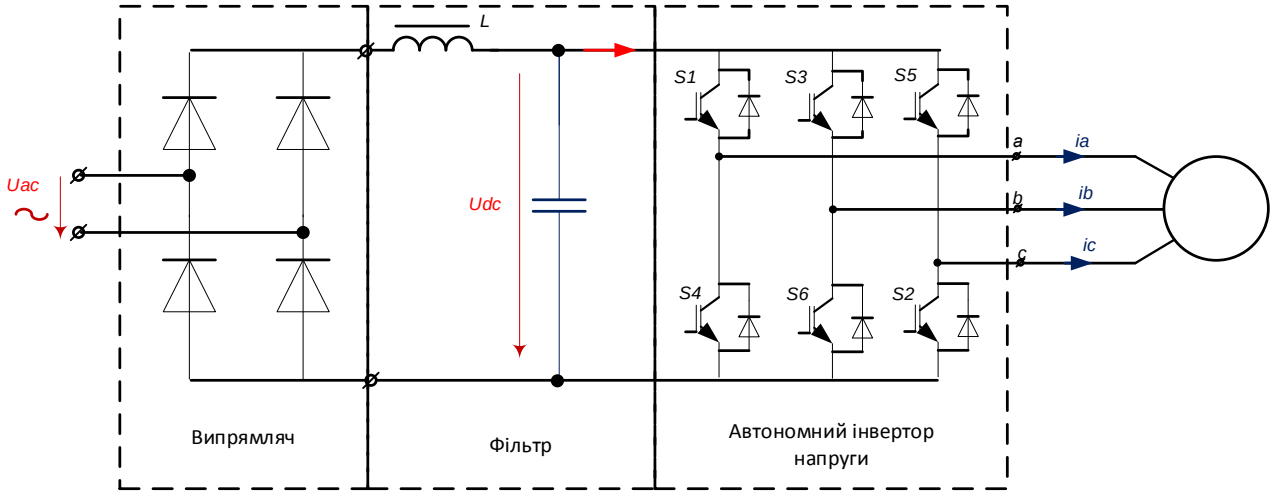

Рис. 1. Структурна схема перетворювача частоти з живленням від однофазної мережі

Сьогодні перетворювачі частоти як правило використовують некеровані мостові випрямлячі для перетворення змінної вхідної напруги в напругу шини постійного струму. Такий пристрій під час роботи на активне навантаження споживає практично синусоїдний струм, формуючи на виході пульсуючу напругу. Однак в перетворювачах частоти для забезпечення на виході такого випрямляча постійного значення напруги змінну складову відфільтровують за допомогою батареї конденсаторів (в пристроях малої потужності індуктивна складова фільтра L відсутня). Таким чином випрямляч працює у режимі роботи на активно-ємнісне навантаження.

За такого режиму випрямляч може спричинювати спотворення в лінії живлення змінного струму через спосіб, яким випрямляч випрямляє змінний струм. Струм не може текти з випрямляча в шину постійного струму до тих пір, поки вхідна напруга нижче, ніж напруга в шині постійного струму. Як видно з часових діаграм рис. 3, це відбувається тільки в короткий період часу в кожній фазі. Ці явища викликають формування несинусоїдного струму, що споживається перетворювачем частоти. Щоб передати енергію, яка потрібна двигуну, за такий короткий період часу, піковий струм повинен бути великим.

Для оцінювання спотворення споживаного струму за різних експлуатаційних факторів доцільно використати гармонічний аналіз, за яким будь-яка повторювана форма кривої може бути описана математично як ряд чистих синусоїдних кривих [17]. Ці синусоїдні криві складаються з основної частоти і кратних частот, які називаються гармоніками.

Найбільш детальний метод описує амплітуду компонента кожної індивідуальної гармоніки, як в абсолютних одиницях (таких як ампери, вольти тощо), так і у відсотках від основного компонента. При цьому можливо визначити джерело гармонічних спотворень. Наприклад, у електричній системі з трифазним симетричним трифазним можуть бути згенеровані лише гармоніки некратні 2 або 3 (5, 7, 11 і подібні гармоніки). Якщо в системі присутня третя гармоніка, вона, ймовірно, є результатом однофазних навантажень або несиметрії фаз в трифазних мережах із нейтраллю. Детальний аналіз допомагає також в проєктуванні спеціальних фільтрів для вирішення проблем гармонічних спотворень.

При менш детальному підході часто використовується сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень THD струму (Total Harmonic Distorsions)[17]. Цей параметр розраховується в процентному відношенні як квадратний корінь суми квадратів відносного значення кожної окремої гармоніки струму:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{K} I_k^{\,2}}}{I_1}, \qquad (1)$$

де I_1 та I_k – значення першої та k-ї гармонік струму, що діють.

Для дослідження гармонічного складу споживаного струму в системі електропривода ПЧ-АД використано однофазний частотний перетворювач ATV31C018M2 та асинхронний двигун з короткозамкненим ротором АИР56В4УЗ. Проведення експериментальних досліджень здійснено за допомогою зібраної дослідної установки, схема якої зображена на рис. 2.

На схемі: PA – сенсор струму, PV – сенсор напруги, G – генератор незалежного збудження, A1-A2 – обмотка якоря, F1-F2 – обмотка збудження, Rз – задаючий потенціометр, Rг – гальмівний резистор, M – досліджуваний асинхронний двигун, UI1 – перетворювач частоти, UI2 – ШІМ регулятор струму збудження генератора, PC – персональний комп'ютер, ∧/# - аналогово-цифровий перетворювач (АЦП).

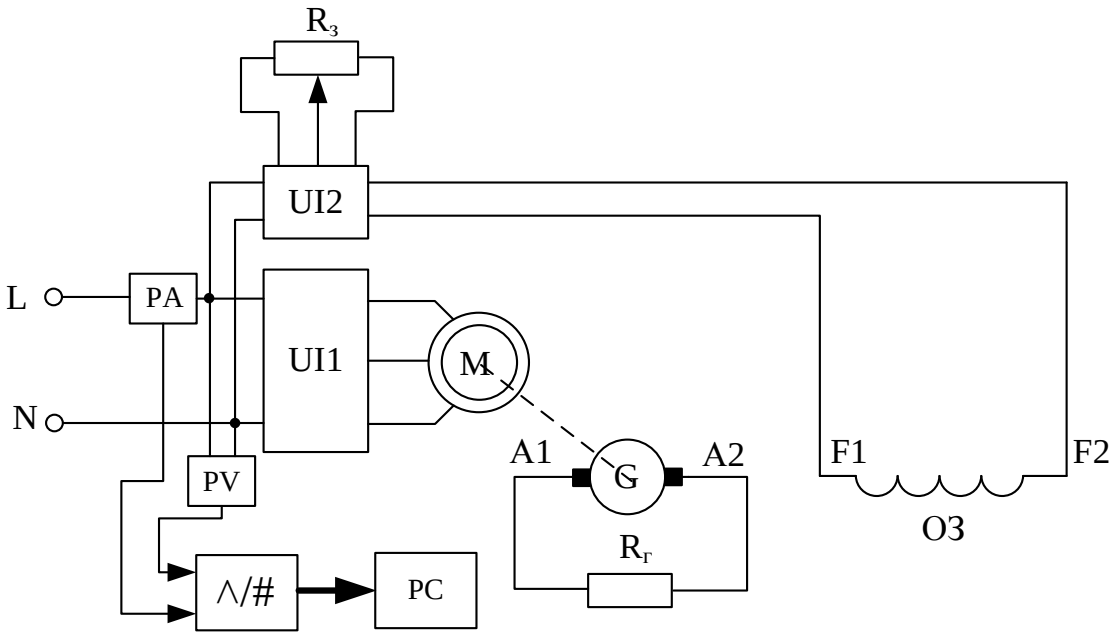

Рис. 2. Схема дослідної установки для дослідження однофазного перетворювача частоти Altivar 31 (ATV31C018M2)

За допомогою наведеної установки виконано експериментальні дослідження однофазного перетворювача Altivar 31, за результатами яких побудовано часові діаграми струму та відносної лінійної напруги при частоті на виході 20 Гц для двох режимів роботи – холостого ходу та номінального навантаження. Вказані графіки після обробки в середовищі Mathcad 14 зображені на рис. 3.

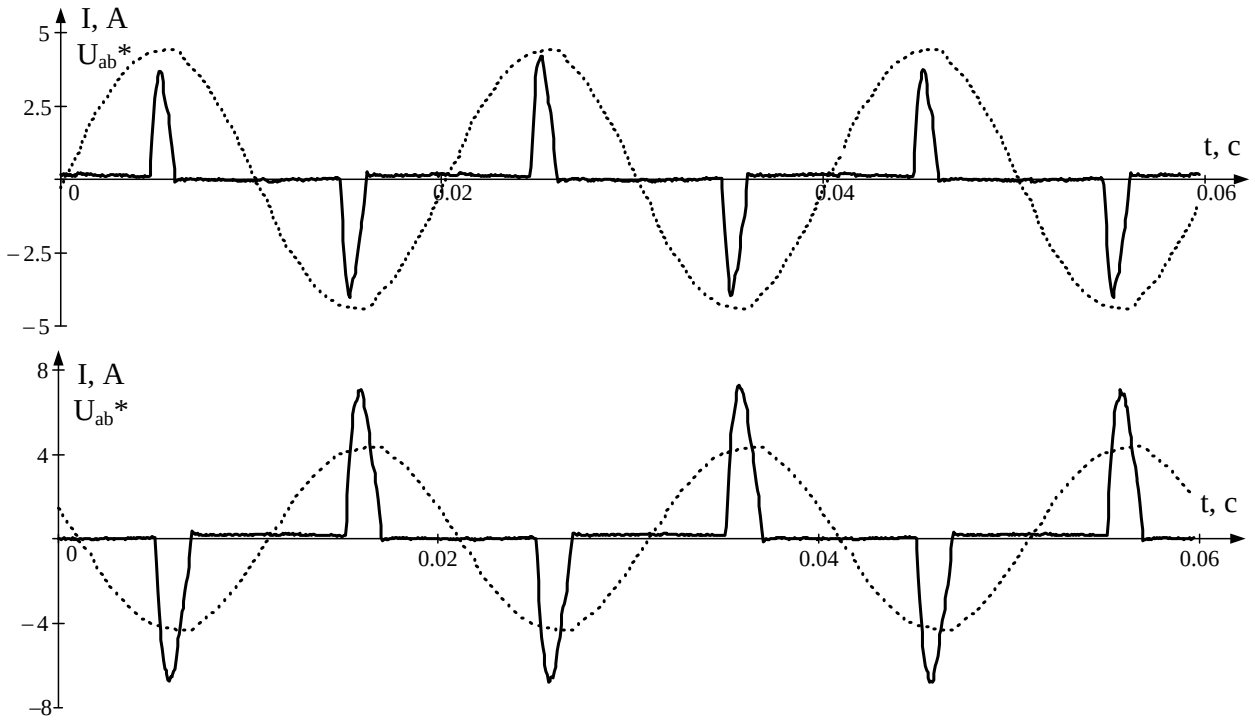

Рис. 3.Часові діаграми струму та лінійної напруги для режимів холостого ходу та номінального навантаження, однофазного перетворювача частоти Altivar 31 за частоти на виході 20 Гц

Отримано графіки струму та відносної лінійної напруги за частоти на виході 50 Гц для двох режимів роботи – холостого ходу та номінального навантаження. Вказані графіки після обробки в середовищі Mathcad 14 зображені на рис. 4.

Для гармонічного аналізу струму перетворювача частоти скористаємося дискретним перетворенням Фур'є, для масиву дискретних значень виміряного струму в межах п'яти періодів. Періодичну несинусоїдальну функцію можна представити у вигляді наступної суми:

$$i(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{K}\left(a_k \cdot \cos\left(k\omega \cdot t\right) + b_k \cdot \sin\left(k\omega \cdot t\right)\right), \tag{2}$$

де коефіцієнти гармонічних складових знаходяться відповідно до рівнянь:

$$a_0 = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}\left(I_i\right), \tag{3}$$

де m – це кількість наборів дискретних значень струму I_i на періоді зміни періодичної функції,

$$a_k = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}\left(I_i \cdot \cos\left(k \cdot i \cdot \Delta t\right)\right), \tag{4}$$

де Δt – це дискретність наборів в часі, яка залежить від частоти дискретизації АЦП; k – номер гармоніки; К – кількість гармонік,

$$b_k = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}\left(I_i \cdot \sin\left(k \cdot i \cdot \Delta t\right)\right), \tag{5}$$

$$\omega = 2\pi \cdot \mathrm{f}. \tag{6}$$

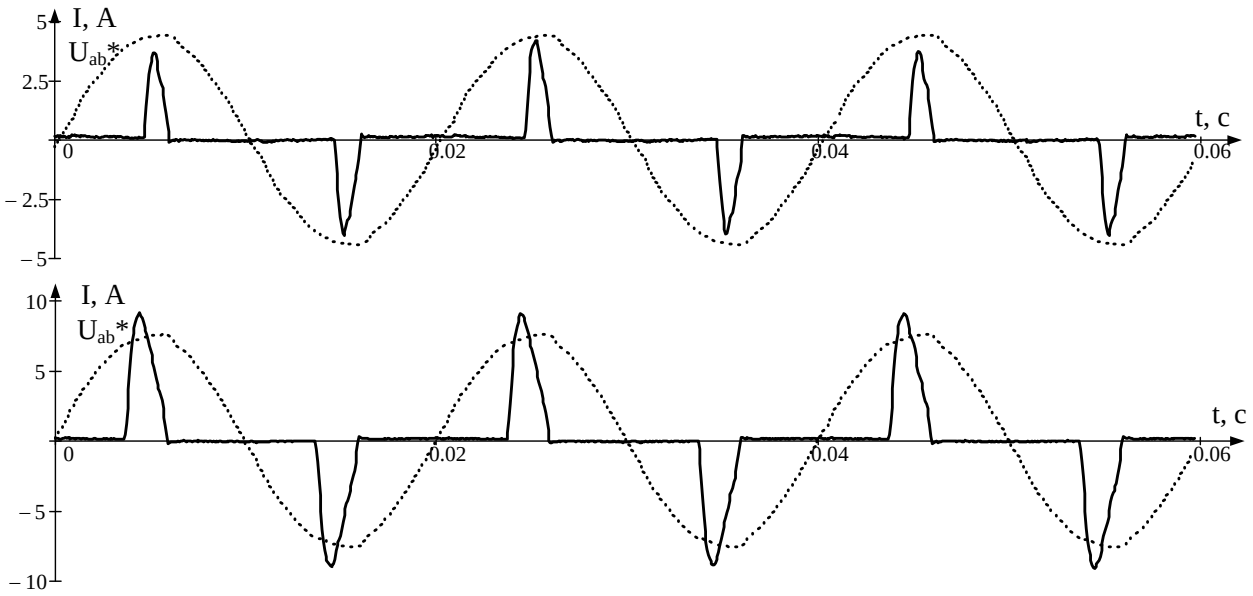

Рис. 4. Часові діаграми струму та лінійної напруги для режимів холостого ходу та номінального навантаження, однофазного перетворювача частоти Altivar 31 за частоти на виході 50 Гц

На рис. 5 зображено розклад струму однофазного перетворювача частоти Altivar 31 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно за номінального навантаження та частоти на виході 20 Гц.

Як видно збільшення кількості гармонічних складових сприяє більшому наближенню графіків струму до апроксимованої функції.

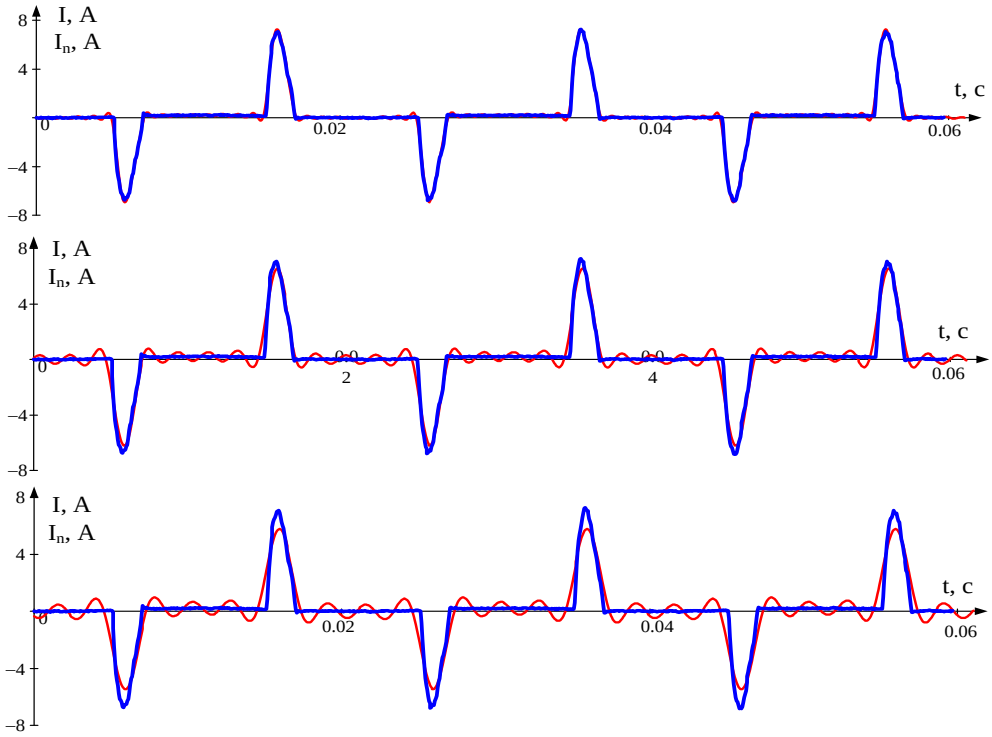

Рис . 5. Часові діаграми розкладу струму однофазного перетворювача частоти Altivar 31 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно за номінального навантаження та частоти на виході 20 Гц

На рис. 6 зображено розклад струму однофазного перетворювача частоти Altivar 31 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно за номінального навантаження та частоти на виході 50 Гц.

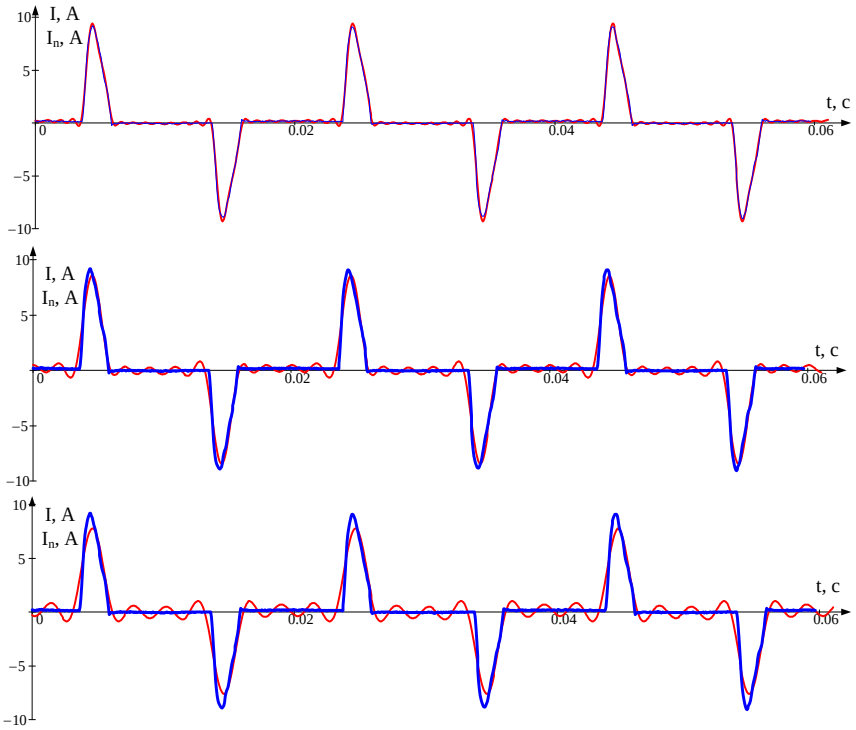

Рис. 6. Часові діаграми розкладу струму однофазного перетворювача частоти Altivar 31 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно за номінального навантаження та частоти на виході 50 Гц

Амплітудні значення струму різних гармонічних складових знайдемо за виразом:

$$I_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}\,. \tag{7}$$

В результаті розкладу струму на гармонічні складові отримаємо спектр вхідного струму для режимів холостого ходу та номінального навантаження однофазного перетворювача частоти Altivar 31, за вихідної частоти 20 та 50 Гц. Відповідні графіки в абсолютному та відносному (до основної гармоніки) вигляді наведено на рис. 7 та 8.

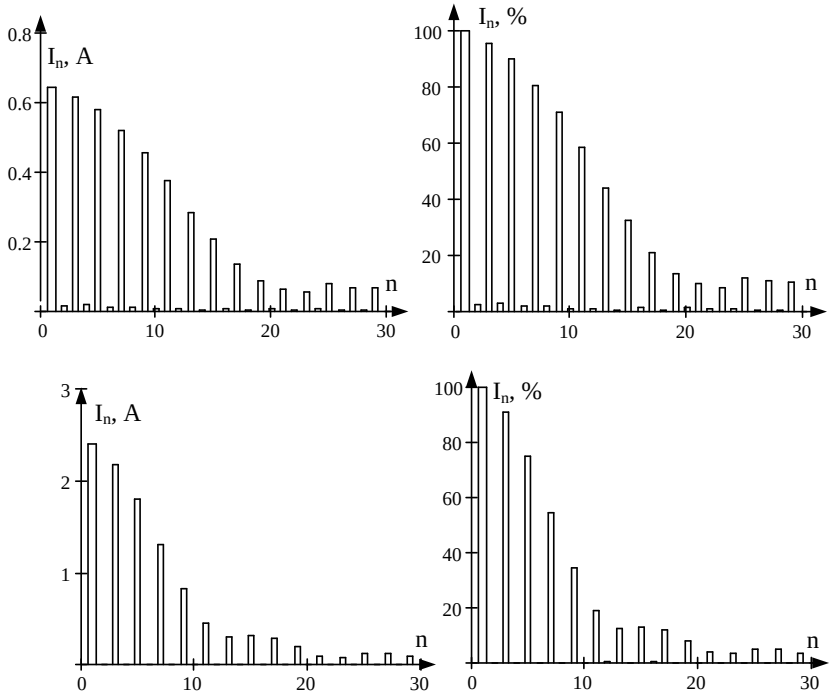

Рис. 7. Спектр вхідного струму для режимів холостого ходу та номінального навантаження однофазного перетворювача частоти Altivar 31, за вихідної частоти 50 Гц

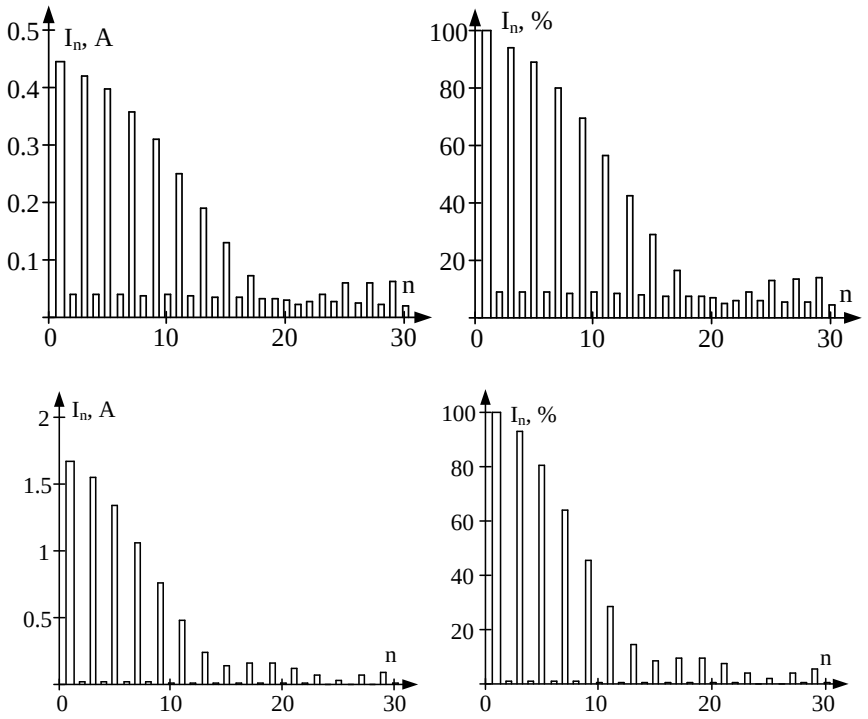

Рис. 8. Спектр вхідного струму для режимів холостого ходу та номінального навантаження однофазного перетворювача частоти Altivar 31, за вихідної частоти 20 Гц

Розрахунок сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень THD струму, виконаний за формулою (1) для різних значень коефіцієнта навантаження β, зведено до таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнт гармонічних спотворень струму однофазного частотного перетворювача ATV31C018M2

Режим АД	50Гц, β = 0 %	50Гц, β=100 %	20Гц, β=0 %	20Гц, β=100 %
THD	1,895	1,379	1,891	1,507

Як видно із спектра вхідного струму, в ньому присутні тільки непарні гармоніки, найбільший вплив особливо в режимі навантаження чинять гармоніки менші 19. Коефіцієнт гармонічних спотворень струму знижується із навантаженням перетворювача частоти та підвищується із зменшенням частоти на виході перетворювача.

Результати експерименту свідчать, що зміна навантаження на валу двигуна змінює активну складову опору активно-ємнісного навантаження однофазного мостового випрямляча на вході перетворювача частоти. Із збільшенням навантаження (β) зростає струм навантаження ($I_{load} \approx P_{nom} \cdot \beta / U_{dc}$, де U_{dc}– напруга DC-ланки), і конденсатор фільтра (C) розряджається швидше за законом $dU_{dc}/dt = -I_{load} / C$. Це збільшує часовий інтервал, протягом якого струм споживається з мережі. Як наслідок, імпульсний струм стає ширшим, тобто його форма наближається до синусоїдної, що призводить до зменшення THD і покращення форми кривої струму.

Також зниження частоти за законом U/f = const призводить до пропорційного зниження напруги на виході перетворювача частоти, що знижує активну складову струму навантаження, збільшуючи час утримання U_{dc} на вищому рівні і звужуючи імпульси струму, так як струм з мережі тече в DC-ланку тільки коли значення напруги мережі вище за U_{dc}. Як наслідок, THD зростає, що підтверджено результатами проведеного експериментального дослідження (Таблиця 1).

Таким чином використання у системах електропостачання однофазних перетворювачів

частоти супроводжується протіканням несинусоїдних струмів в їх елементах зі значеннями коефіцієнта гармонічних спотворень, що виходять за межі регламентовані стандартом [18]. Це підсилюється тим, що в умовах сьогодення, застосування частотно-регульованих електроприводів є досить значним та має тенденцію до збільшення. Тому пошук способів зменшення спотворення форми струмів і напруг в системах електропостачання є актуальною задачею. Вона передбачає розробку як технічних, так і нормативних рішень. Останні заходи мали б включати розробку такої нормативної бази у галузі контролю за якістю електричної енергії, що унеможливлювали реалізацію та використання пристроїв на вході яких мостовий випрямляч з ємнісним навантаженням без додаткових засобів, які б забезпечували гармонічний склад споживаного струму в певних прийнятних межах.

Оскільки наявні стандарти, зокрема [18] попри наявність обмежень, не передбачають механізмів впливу на виробників та експлуатантів частотних перетворювачів, які перевищують встановлені нормативні значення THD. В результаті цього практично відсутня відповідальність за такі відхилення, що не створює мотивації для виробників, постачальників і користувачів обладнання дотримуватися встановлених норм. Ґрунтовний аналіз регуляторних аспектів виходить за межі цієї статті.

Одним із ефективних технічних засобів зменшення нелінійних спотворень і підвищення коефіцієнта потужності є використання перетворювачів з корегуванням коефіцієнту потужності (PFC) [14] у якості складової частини перетворювачів частоти або ж додаткові перетворювачі, які можна було б підключати між мережею і звичайним перетворювачем частоти.

На рис. 9 наведена схема перетворювача з корегуванням коефіцієнту потужності. Форма споживаного струму у таких пристроях забезпечується синусоїдною за рахунок широтно-імпульсного регулювання за допомогою напівпровідникових ключів, що здійснюють перемикання з певною частотою змінюючи коефіцієнт заповнення імпульсу таким чином, щоб форма вхідного струму була модульованою синусоїдною функцією. У таких пристроїв вхідний струм буде складатись із основної гармонічної складової та складової частоти перемикання, що зазвичай є значно більшою за основну частоту (в десятки, а то й сотні разів), тому її досить таки легко відфільтрувати.

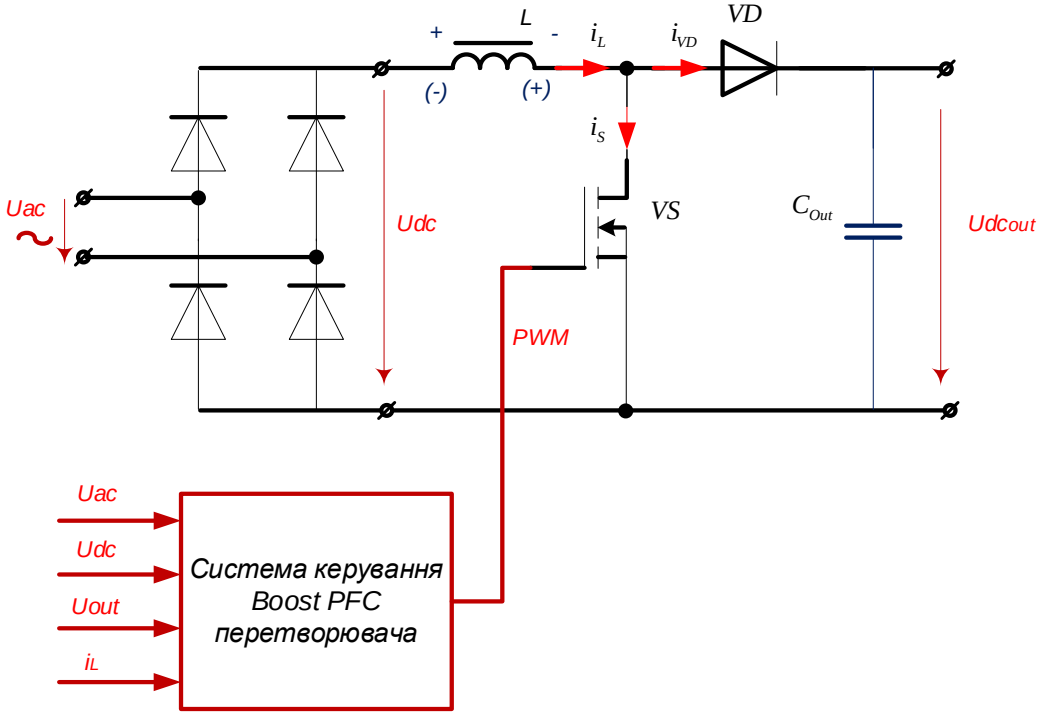

Рис. 9. Коректор коефіцієнта потужності (PFC)

Між тим, крім ефекту покращення форми струму та коефіцієнта потужності вказані перетворювачі, за умови обладнання відповідними зворотними зв'язками, дозволять стабілізувати напругу ланки постійного струму за різких змін напруги однофазної мережі. Динамічні режими роботи запропонованих рішень виходять за межі роботи і потребують подальших досліджень.

Висновки

У роботі проведено експериментальне дослідження впливу вищих гармонік, генерованих однофазним перетворювачем частоти Altivar 31, на параметри якості електроенергії в системі електропостачання. Встановлено, що у спектрі вхідного струму перетворювача присутні тільки непарні гармоніки, серед яких найбільший вплив мають гармоніки менші 19-ої, особливо в режимі навантаження. Показано, що коефіцієнт нелінійних спотворень струму знижується зі збільшенням навантаження перетворювача та зростає зі зменшенням його вихідної частоти, що пов'язано зі зміною співвідношення між ємнісною та активною складовою у навантаженні вхідного випрямляча перетворювача частоти. Більш детально встановити зв'язок між гармонічним складом споживаного струму та різними параметрами роботи перетворювача частоти можуть подальші теоретичні та експериментальні дослідження, що можуть бути здійсненні на основі математичного та імітаційного моделювання розглянутих систем.

На основі аналізу отриманих результатів рекомендується застосування активних імпульсних коректорів коефіцієнта потужності (PFC), які дозволяють зменшити рівень гармонічних спотворень, стабілізувати напругу ланки постійного струму та підвищити коефіцієнт потужності. Також зазначено актуальність вдосконалення нормативно-правової бази щодо мінімізації негативного впливу перетворювачів частоти на якість електричної енергії в системах електропостачання.

Врахування отриманих даних під час налаштування компенсуючих пристроїв дозволить знизити втрати в мережах, підвищивши енергоефективність та експлуатаційну надійність однофазних систем електроприводу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія / Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Стасюк І. В. Харків : НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.

2. Аналіз сучасного стану та перспектив коригування енергетичного балансу підприємств гірничодобувної галузі / О. М. Сінчук та ін. *Вісник ВПІ*. 2021. Вип. 4. С. 56–61.

3. Malesani L., Tenti P. Three-phase AC/DC PWM converter with sinusoidal AC currents and minimum filter requirements. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1987. Vol. IA-23, №1. P. 71–77.

4. Aspects of implementation of intelligent control systems at infrastructure, energy and transport facilities : monograph / S. M. Boiko et al. Warsaw : iScience Sp. z.o.o., 2024. 205 p.

5. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer, 2014. 396 p.

6. Рогаль В. В., Демченко Ю. С. Дослідження спектру вхідного струму високочастотних коректорів коефіцієнта потужності. Технічна електродинаміка. 2014. № 5. С. 80–82.

7. Dependence of input current quality on number of phases of multiphase interleaved PFC / P. S. Safronov et al. *Proceedings of IEEE ELNANO Conference*. 2015. P. 478–480.

8. Contemporary frequency converters in electric drive systems : tutorial / M. V. Zagirnyak et al. 2nd edition, revised and corrected. Kharkiv : Publisher "Tochka", 2017. 206 p.

9. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний та ін. Кременчук, 2001. 410 с.

10. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

11. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання : навч. посіб. Дніпропетровськ : НГА України, 2001. 137 с.

12. Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Розводюк М. П., Проценко Д. П., Бомбик В. С., Жуков О. А. Вінниця : ВНТУ, 2023. 149 с.

13. Родінков В. І., Коваль А. М. Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному однотактному керованому випрямлячі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2005. № 1. С. 51–55.

14. Rashid M. Power electronics handbook : devices, circuits, and applications handbook. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2017. 1409 p.

15. Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 300 с.

16. Силові перетворювачі відновлювальної енергетики. Навчальний посібник / Бойко С. М., Касаткіна І. В., Городній О. М., Жуков О. А. Варшава: iScience Sp. z.o.o., 2024 230 с.

17. Теоретічні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / Карпов Ю. О., Кацив С. Ш., Кухарчук В. В., Ведміцький Ю. Г., під ред. проф. Ю. О. Карпова. Херсон : ОЛДІ- ПЛЮС, 2014. 326 с.

18. ДСТУ EN 61000-6-1:2016. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Загальні стандарти. Імунітет до електромагнітних завад для побутового, комерційного та легкопромислового середовища [Чинний від 2018-01-01]. К.: Мінекономрозвитку України, 2018. 26 с.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2025.
Стаття пройшла рецензування 28.06.2025.

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, ORCID: 0000-0001-7451-7633, e-mail: alex4444_2004@ukr.net.

Проценко Дмитро Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, ORCID: 0000-0002-5611-7262, e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua.
Вінницький національний технічний університет.

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, ORCID: 0000-0001-9778-2202, e-mail: boikosn2017@gmail.com.
Національний університет «Запорізька політехніка».

Коваль Андрій Миколайович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, ORCID: 0009-0004-1156-3930, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.ua.
Вінницький національний технічний університет.

Риков Геннадій Юрійович – старший викладач кафедри електротехніки, ORCID: 0000-0002-7975-6796, e-mail: grykov68@gmail.com.
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського.