https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-21
УДК 621.341.572

ЖУКОВ ОЛЕКСІЙ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-7451-7633
e-mail: alex4444_2004@ukr.net
ПРОЦЕНКО ДМИТРО
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-5611-7262
e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua
БОЙКО СЕРГІЙ
Національний університет «Запорізька політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-9778-2202
e-mail: boikosn2017@gmail.com
БАБІЙ СЕРГІЙ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8043-0646
e-mail: babiy82sm@gmail.com
БОМБИК ВАДИМ
Вінницький національний технічний університет
e-mail: vsbombyk@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК ВІД РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ В МЕРЕЖУ ЖИВЛЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

У даній роботі проведено комплексний аналіз впливу вищих гармонік, що генеруються частотним перетворювачем, на трифазну систему електропостачання електропривода. Приділено увагу визначенню рівня гармонійних спотворень у вхідному струмі перетворювача. Для проведення експериментальних досліджень розроблено та реалізовано схему спеціалізованої дослідної установки, що забезпечує можливість вимірювання параметрів роботи частотного перетворювача в режимі реального часу. Проведено експериментальні випробування частотного перетворювача Altivar 71 у трьох режимах роботи: холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження на 25%. Виміряні значення струму та відносної лінійної напруги було оброблено у середовищі Mathcad 14 та представлено у вигляді графіків, що демонструють зміну параметрів електроенергії за різних умов експлуатації. Аналіз отриманих спектрів гармонійних складових показав, що в системі присутні переважно непарні гармоніки, серед яких найбільший вплив мають 5-та та 7-ма гармоніки, особливо в умовах навантаження. Було встановлено, що збільшення навантаження перетворювача сприяє зниженню коефіцієнта гармонійних спотворень, тоді як зменшення вихідної частоти частотного перетворювача, навпаки, призводить до зростання рівня спотворень Одним із найефективніших методів зниження рівня гармонійних спотворень, а також підвищення коефіцієнта потужності системи, є застосування коректорів коефіцієнта потужності (PFC). Дані пристрої, що базуються на використанні високоефективних імпульсних схем із низькими енергетичними втратами, не лише покращують форму струму та підвищують коефіцієнт потужності, а й забезпечують стабілізацію напруги в колі постійного струму навіть за умов різких просадок напруги живлення. У результаті дослідження визначено рівні коефіцієнтів гармонійних спотворень для різних режимів роботи частотного перетворювача, а також запропоновано використання PFC для мінімізації негативного впливу вищих гармонік на систему електропостачання електропривода. Впровадження таких заходів дозволяє підвищити ефективність електроприводних систем, забезпечити покращення показників якості електроенергії та стабільну роботу інверторів.

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

ZHUKOV OLEKSII, PROCENKO DMYTRO
Vinnytsia National Technical University
BOIKO SERHII
National University «Zaporizhzhia Polytechnic»
BABIY SERGIY, BOMBYK VADIM
Vinnytsia National Technical University

RESEARCH INTO THE GENERATION OF HIGHER HARMONICS FROM THE OPERATION OF FREQUENCY CONVERTERS IN THE AC POWER NETWORK

In this work, a comprehensive analysis of the influence of higher harmonics generated by a frequency converter on a three-phase power supply system of an electric drive was carried out. Attention was paid to determining the level of harmonic distortion in the input current of the converter. For experimental research, a scheme of a specialized experimental setup was developed and implemented, which provides the possibility of measuring the operating parameters of the frequency converter in real time. Experimental tests of the Altivar 71 frequency converter were carried out in three operating modes: idle, rated load and overload by 25%. The measured values of current and relative line voltage were processed in the Mathcad 14 environment and presented in the form of graphs demonstrating the change in electricity parameters under different operating conditions. Analysis of the obtained spectra of harmonic components showed that the system contains mainly odd harmonics, among which the 5th and 7th harmonics have the greatest influence, especially under load conditions. It was found that increasing the load of the converter contributes to a decrease in the harmonic distortion factor, while reducing the output frequency of the frequency converter, on the contrary, leads to an increase in the level of distortion. One of the most effective methods of reducing the level of harmonic distortion, as well as increasing the power factor of the system, is the use of power factor correctors (PFC). These devices, which are based on the use of highly efficient pulse circuits with low energy losses, not only improve the current shape and increase the power factor, but also provide voltage stabilization in the DC circuit even under conditions of sharp voltage drops. As a result of the study, the levels of harmonic distortion factors for different operating modes of the frequency converter were determined, and the use of PFC was also proposed to minimize the negative impact of higher harmonics on the power supply system of

the electric drive. The implementation of such measures allows to increase the efficiency of electric drive systems, ensure improved electricity quality indicators and stable operation of inverters.

Keywords: electric drive, three-phase power supply system, frequency converter, higher harmonics.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025
Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми

Електропривод був і залишається одним із основних споживачів електричної енергії. Застосування деяких елементів в системах його управління можуть викликати зменшення якості електричної енергії в енергосистемі та зменшення ефективності споживання електричної енергії в цілому [1, 2].

Під час розробки та вдосконалення промислових електроприводів дедалі ширше застосовуються частотні перетворювачі, які відіграють ключову роль у системах керування електроприводами на основі асинхронних і синхронних електродвигунів. Відомо, що у мережах змінного струму частотний перетворювач виступає як нелінійне навантаження, струм якого містить вищі гармонійні складові [3].

Перевантаження нульових робочих провідників кабельних ліній гармоніками, кратними трьом, може призводити до їх перегріву та поступового руйнування. Крім того, наявність гармонік спричиняє додаткові енергетичні втрати в трансформаторах. В умовах несинусоїдальності струму погіршуються експлуатаційні характеристики батарей конденсаторів, що призводить до скорочення строку служби електрообладнання через прискорене теплове та електричне старіння ізоляції. Окрім цього, гармонійні спотворення можуть викликати електромагнітні перешкоди, що негативно впливають на роботу телекомунікаційних мереж. Зростаюча актуальність проблеми гармонійних викривлень при застосуванні частотних перетворювачів потребує комплексного аналізу та впровадження ефективних методів їх мінімізації [4].

В свою чергу зниження пропускної здатності трансформатора через несинусоїдальні струми визначається збільшенням додаткових втрат від струмів вищих гармонік. Трансформатор на відміну від провідника являє собою більш складне електротехнічне обладнання, в якому втрати активної потужності зосереджені не тільки в обмотках, але і в інших конструкційних частинах через дії змінного електромагнітного поля. Як наслідок, на першому етапі дослідження необхідно дати класифікацію втрат активної потужності в трансформаторі і визначити складові, які залежать від значення і спектра струму, який протікає через трансформатор. Саме тому дослідження впливу гармонік перетворювача частоти на систему електропостачання актуальне та спрямоване на покращення показників якості електричної енергії в енергосистемі.

Аналіз останніх джерел

Значна частина досліджень в галузі електроприводу направлена на покращення систем керування та енергетичних характеристики самого електропривода, наприклад, в роботах [5-7]. Інші роботи присвячені питанню моделювання функціонування електропривода методами математичного моделювання як складової частини електромеханічного комплексу [9-11]. З поміж іншого в роботі [8] запропоновано комп'ютерну модель перетворювачів частоти, котрі використовуються у електроприводі в середовищі ППП Matlab. Між тим, вкрай недостатньо проведено досліджень щодо впливу вищих гармонік перетворювача частоти на систему електропостачання перетворювача.

Метою роботи є: зниження гармонійних спотворень від роботи перетворювачів частоти за рахунок експериментального дослідження вхідного струму в різних режимах його роботи, що дозволить врахувати це в налаштуванні компенсуючих пристроїв.

Виклад основного матеріалу

У процесі розробки та модернізації промислових електроприводів все ширше використовуються частотні перетворювачі, які виступають ключовим силовим елементом у системах керування електроприводами на основі асинхронних і синхронних двигунів. Як зазначено, в мережах змінного струму частотний перетворювач є нелінійним навантаженням, у струмі якого присутні гармонійні складові вищих порядків.

Перевантаження нульових робочих провідників кабельних ліній гармонійними струмами, кратними трьом, може призводити до їх перегріву та поступового руйнування. Крім того, наявність гармонік спричиняє додаткові енергетичні втрати в трансформаторах. В умовах несинусоїдального струму погіршується робота батарей конденсаторів, що зменшує їхню ефективність, а також скорочується термін експлуатації електрообладнання через інтенсифікацію теплового та електричного старіння ізоляції. Окрім цього, гармонійні спотворення створюють електромагнітні перешкоди, що негативно впливають на функціонування телекомунікаційних мереж.

З огляду на зростаючу актуальність проблеми гармонійних викривлень при застосуванні частотних перетворювачів, виникає необхідність детального дослідження гармонійного складу струму перетворювача частоти та оцінювання його впливу на елементи системи електропостачання електропривода. Для проведення експериментальних досліджень була запропонована схема дослідної установки яка зображена на рисунку 1. [5].

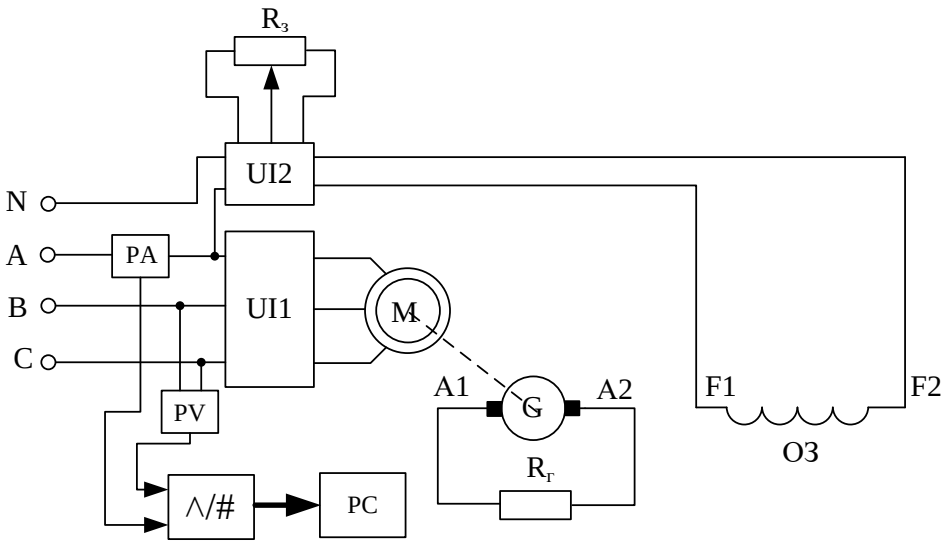


Рис. 1. Функціональна схема установки для вимірювання гармонійного складу струму трифазного частотиого перетворювача Altivar 71 (ATV71H075N4Z)

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

Наведена дослідна установка дозволяє в реальному часі динамічно вимірювати значення вхідного струму та напруги перетворювача частоти при різних навантаженнях, які задаються величиною струму збудження генератора незалежного збудження та при зміні частоти на виході частотного перетворювача. Цифрові дані вимірюваних параметрів реєструються за допомогою плати аналого-цифрового перетворювача (АЦП) E-14-140, що забезпечує точність збору інформації. Подальша обробка та візуалізація отриманих результатів виконуються в програмному середовищі Lgraph2, яке використовується на персональному комп'ютері для аналізу та подальшої інтерпретації даних

На рисунку 2 представлено осцилограми струму та напруги частотного перетворювача, отримані в процесі експериментальних вимірювань. Візуалізація цих параметрів виконана у програмному середовищі Lgraph2, що дозволяє детально проаналізувати зміну електричних характеристик у різних режимах роботи перетворювача.

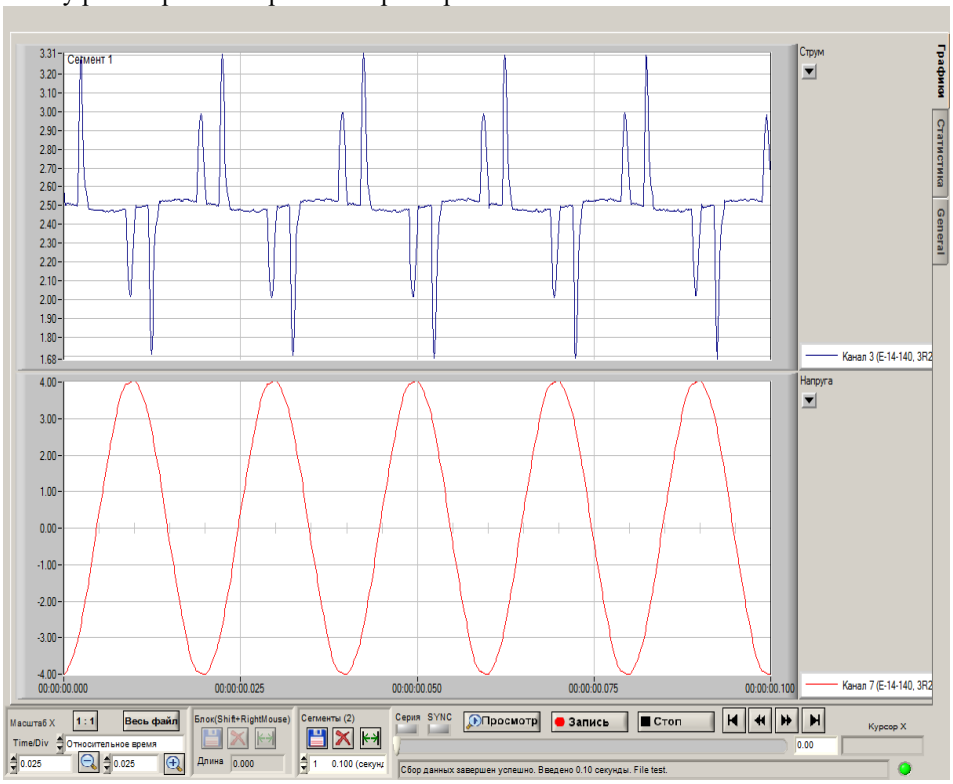


Рис. 2. Графічне відображення осцилограм струму та напруги частотного перетворювача, отримані в середовищі Lgraph2

Для дослідження гармонійного складу струму двигуна в системі електропривода ПЧ-АД використаємо трифазний частотний перетворювач ATV71H075N4Z (таблиця 1).

Таблиця 1

Технічні характеристики трифазного частотного перетворювача ATV71H075N4Z

Параметр	**Значення**
Напруга живлення, В	380-480
Лінійний струм номінальний, А	3-3,7
Номінальна потужність, кВт	0,75
Максимальний перехідний струм, А	3,8
Діапазон вихідної частоти, Гц	0-1600
Номінальна частота ключів, Гц	4000
Маса, кг	3

Для проведення досліджень було обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором АИР56В4УЗ, який характеризується високою надійністю та широким застосуванням у промислових електроприводах. Основні паспортні дані даного електродвигуна наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики електродвигуна АИР56В4УЗ

Найменування характеристики	**Значення**
Номінальна потужність, Рн	180 Вт
Номінальна напруга живлення Uн, В	220/380
Номінальна сила струму статора Δ/Y, Iн	1,087/0,629 А
Тривалість включення, ТВ	100 %
Пусковий струм, Iп	2,5 А
Номінальна частота обертання валу, $n_н$	1372 об/хв
Номінальний коефіцієнт потужності, $cos\varphi_н$	0,68
Номінальний ККД, $\eta_{ном}$	0,64
Кратність максимального моменту, Mmax/Mн	2
Кратність пускового моменту, Mп/Mн	1,62
Момент інерції, Jд	0,036 кг·м^2

У трифазних системах реальний струм в перетворювачі частоти тече в двох імпульсах, із зсувом один від одного на 60°. Ці короткочасні імпульси струму великої амплітуди можуть створити ряд проблем для інших електричних систем. Це відноситься до силових трансформаторів, які живлять перетворювач частоти. Трансформатори розраховані на роботу з рівним синусоїдальним струмом. Короткі імпульси струму, подібні показаним вище, викликають додатковий нагрів в трансформаторі. Якщо трансформатор не розрахований на безпечне сприйняття таких струмів, він може перегрітися і вийти з ладу. Без захисту від гармонійних спотворень може знадобитися збільшення допустимого навантаження трансформатора по струму.

Отже, у ході проведених досліджень було проаналізовано роботу частотного перетворювача Altivar 71 у різних режимах роботи. Зокрема, здійснено вимірювання струму та відносної лінійної напруги для трьох основних режимів: холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження на 25%. Отримані результати дають змогу оцінити динаміку зміни параметрів електропривода.

Вказані графіки після обробки в середовищі Mathcad 14 зображені на рисунку 3.

Для проведення гармонійного аналізу струму частотного перетворювача використано дискретне перетворення Фур'є, що дозволяє визначити спектральний склад струму на основі масиву дискретних значень, отриманих під час вимірювань. Аналіз здійснено в межах п'яти періодів.. Періодичну несинусоїдальну функцію можна представити у вигляді наступної суми:

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

де коефіцієнти гармонійних складових знаходяться згідно рівнянь:

$$a_0 = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}(R_i), \quad (2)$$

$$a_k = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}(R_i \cdot cos(k \cdot i \cdot \Delta t)), \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1}(R_i \cdot sin(k \cdot i \cdot \Delta t)), \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f. \quad (5)$$

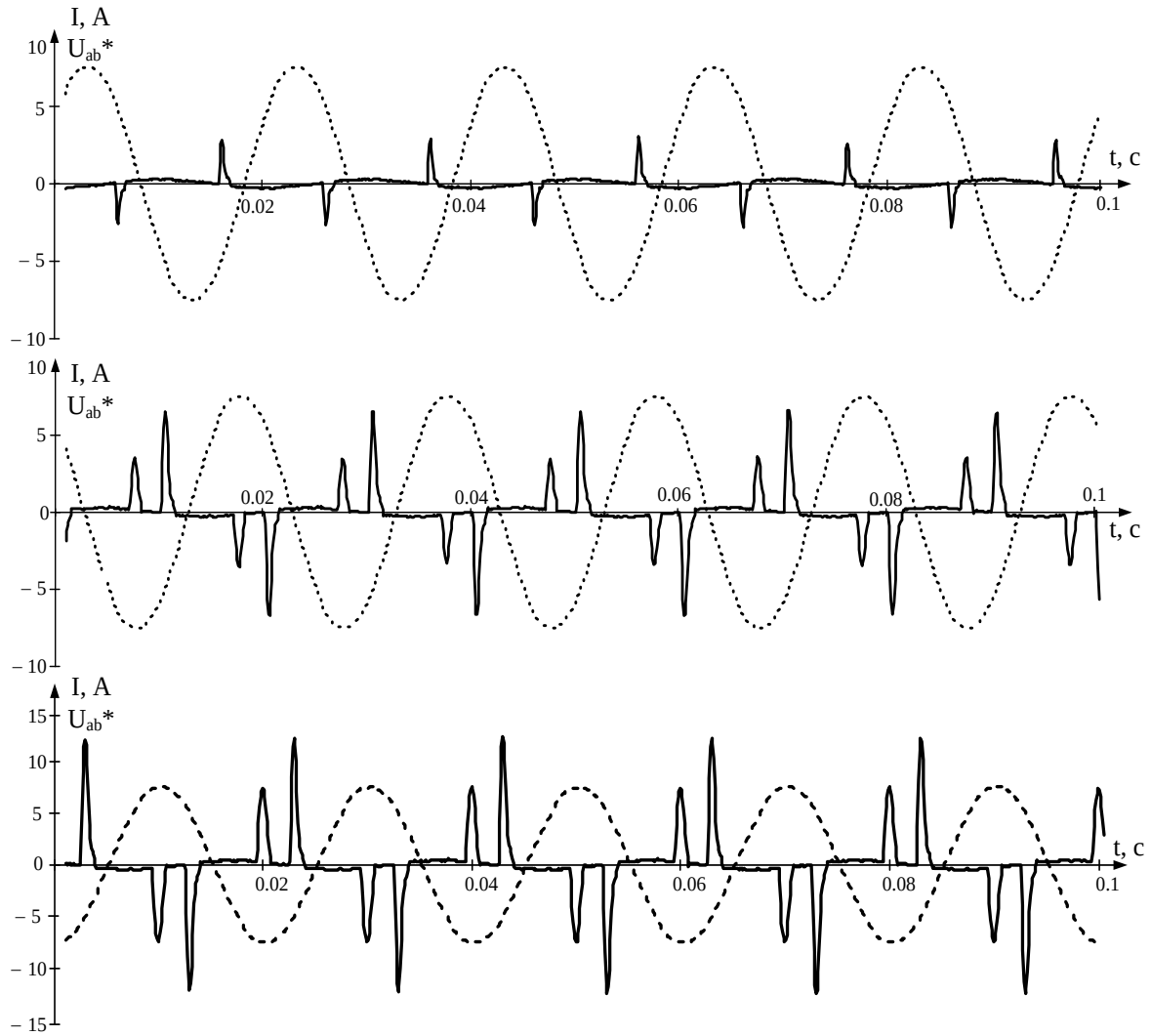


Рис. 3. Графіки струму та лінійної напруги для режимів холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження на 25%, трифазного перетворювача частоти Altivar 71 при частоті на виході 50 Гц

Враховуючи дискретність вхідних даних, m – це кількість наборів дискретних значень на заданому періоді, а Δt – це дискретність наборів в часі, яка залежить від частоти дискретизації АЦП, k – номер гармоніки, К – кількість гармонік.

На рисунку 4 зображено розклад струму трифазного перетворювача частоти Altivar 71 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно при номінальному навантаженні та частоті на виході 50 Гц. Як видно збільшення кількості гармонійних складових сприяє більшому наближенню графіків струму до апроксимованої функції.

Знайдемо амплітудне значення струму різних гармонійних складових як середньоквадратичне значення:

$$I_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}. \quad (6)$$

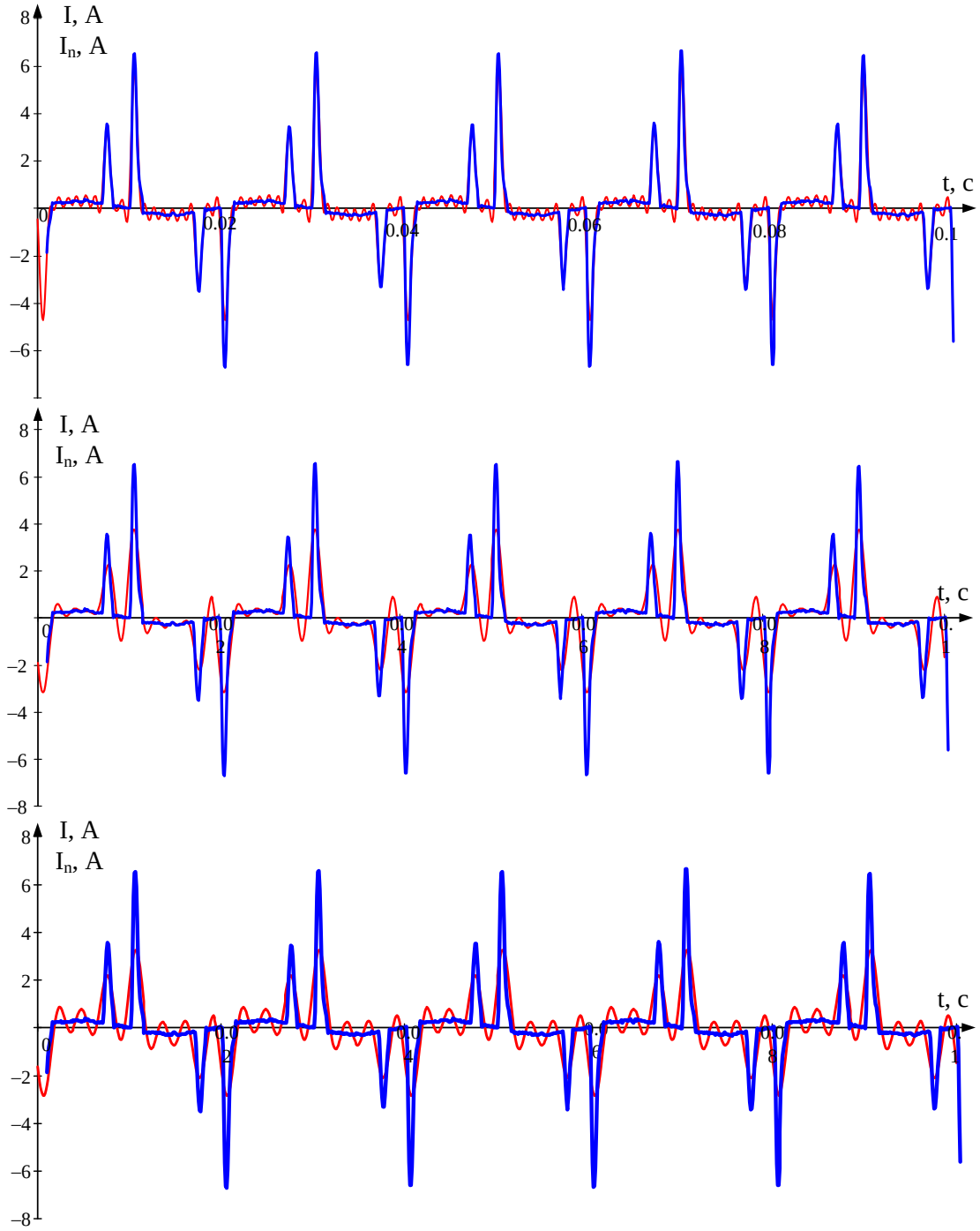


Рис. 4. Графіки розкладу струму трифазного перетворювача частоти Altivar 71 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно при номінальному навантаженні та частоті на виході 50 Гц

У процесі аналізу струму, виконаного методом розкладу на гармонійні складові, було визначено спектр вхідного струму для трьох режимів роботи частотного перетворювача Altivar 71: холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження на 25%. Дослідження проводилося при вихідній частоті 50 Гц.. Отримані спектри представлені у вигляді графіків, що демонструють як абсолютні значення гармонійних складових, так і їх відносний рівень по відношенню до основної гармоніки. Відповідні результати наведено на рисунку 5.

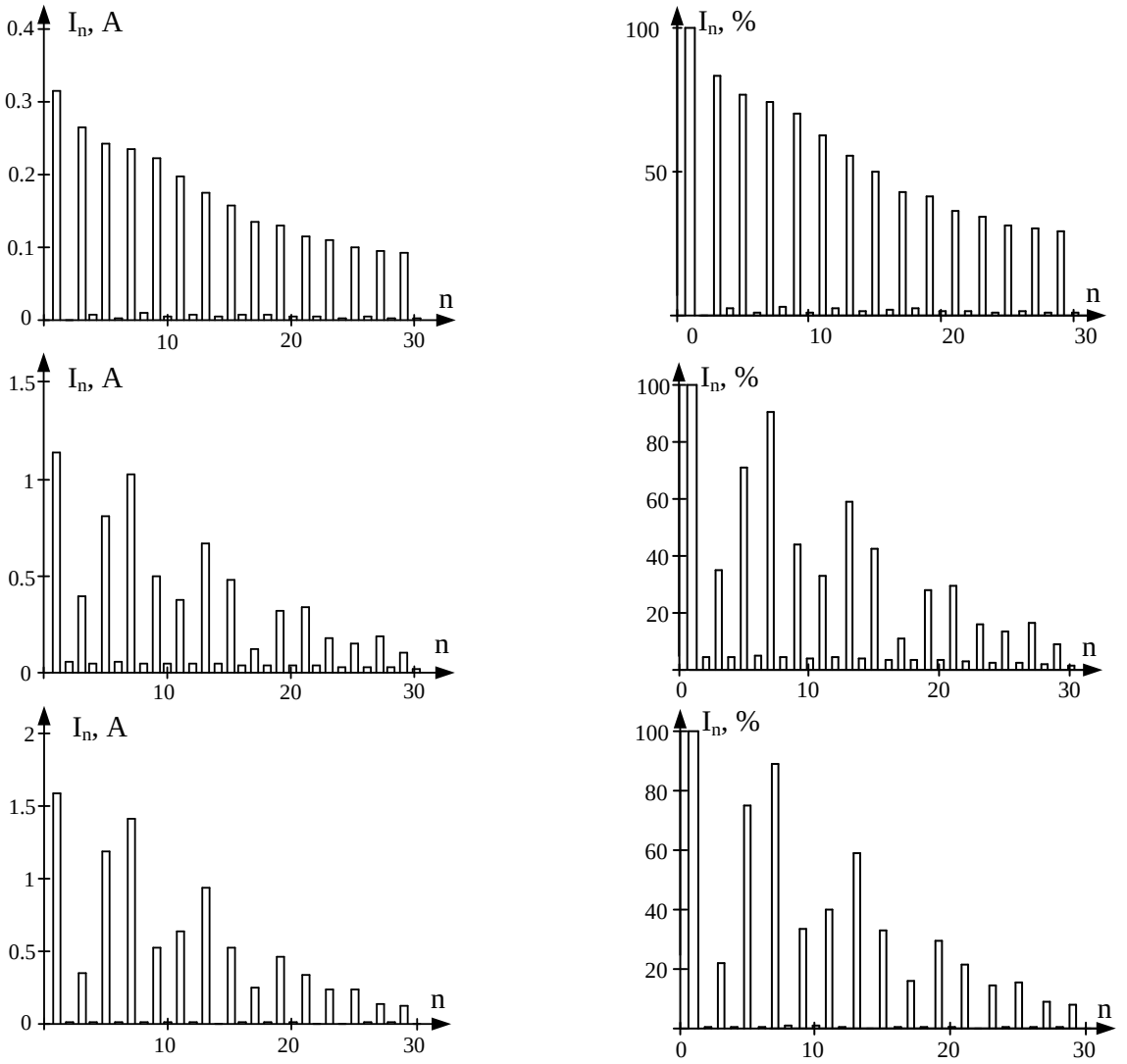


Рис. 5. Спектр вхідного струму для режимів холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження на 25%, трифазного перетворювача частоти Altivar 71, при вихідній частоті 50 Гц.

Здійснимо аналогічні перетворення та розрахунки для роботи перетворювача частоти Altivar 71, при вихідній частоті 25 Гц та номінальному навантаженні. Відповідні графіки струму та лінійної напруги для номінального навантаження трифазного перетворювача частоти Altivar 71 при частоті на виході 25 Гц зображено на рисунку 6.

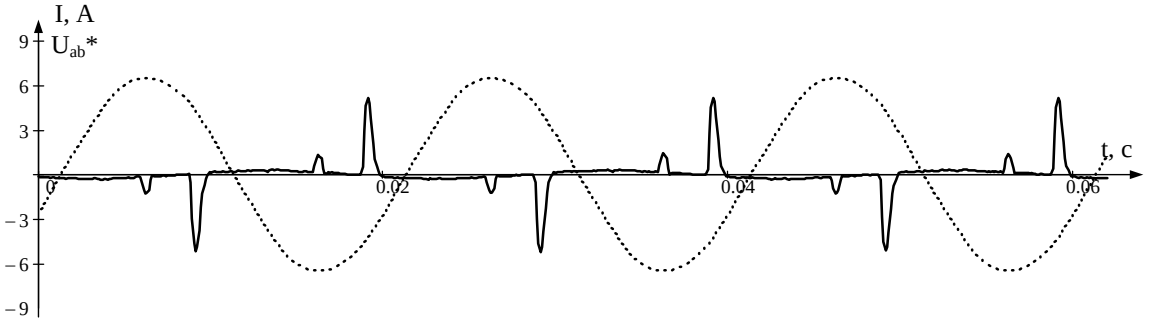


Рис. 6. Графік струму та лінійної напруги для номінального навантаження трифазного перетворювача частоти Altivar 71 при частоті на виході 25 Гц

На рисунку 7 зображено розклад струму трифазного перетворювача частоти Altivar 71 для К = 20, К = 10, К = 5 відповідно при номінальному навантаженні та частоті на виході 25 Гц.

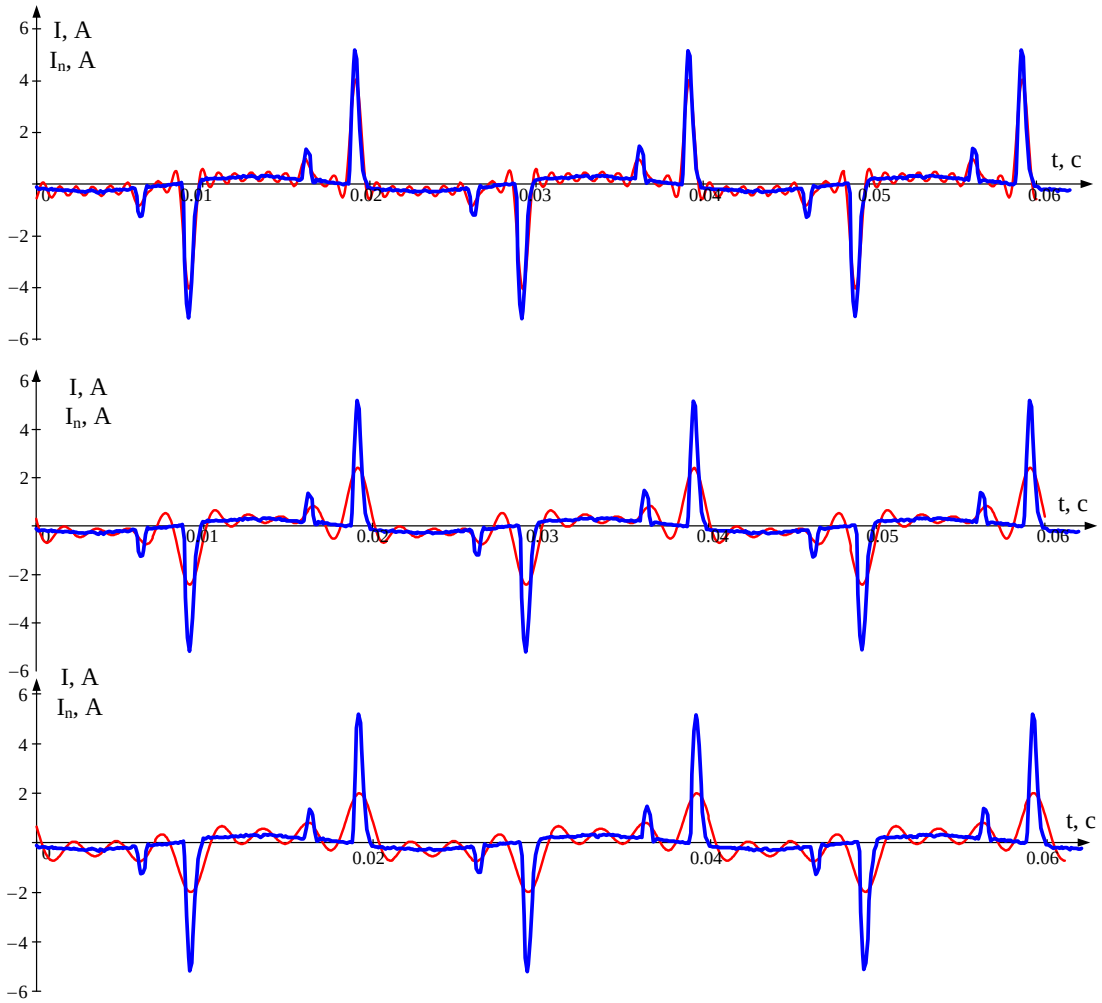


Рис. 7. Графіки спектрального розкладу струму трифазного перетворювача частоти Altivar 71 при номінальному навантаженні та вихідній частоті 25 Гц для K=20, K=10, K=5

У результаті спектрального розкладу струму було визначено склад гармонійних складових вхідного струму частотного перетворювача Altivar 71 при номінальному навантаженні та вихідній частоті 25 Гц. Отримані графіки відображають гармонійний спектр як у абсолютних значеннях, так і у відноснихі щодо основної гармоніки. Відповідні результати представлено на рисунку 8.

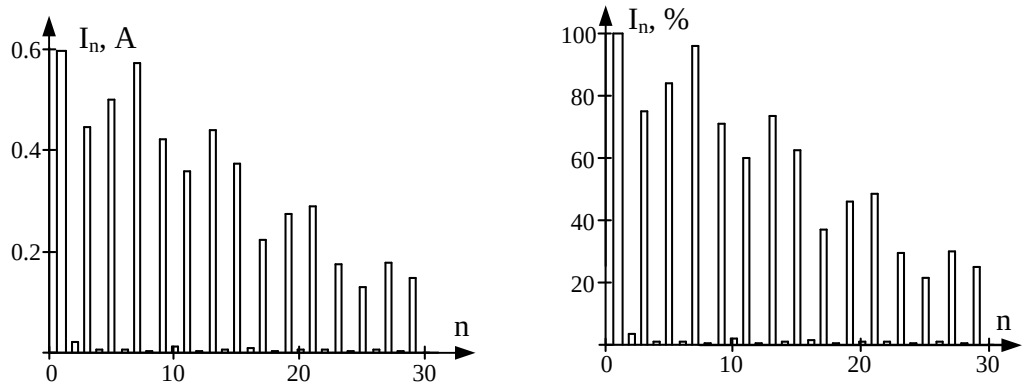


Рис. 8. Спектр вхідного струму для номінального навантаження трифазного перетворювача частоти Altivar 71, при вихідній частоті 25 Гц

Розрахуємо коефіцієнт гармонійних спотворень THD, та зведемо отримані значення для різних значень коефіцієнта навантаження β в таблицю 3:

$$S = \sqrt{\sum_{h=2}^{K} \left(\frac{\sqrt{a_h^2 + b_h^2}}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \right)^2}. \quad (7)$$

Таблиця 3

Коефіцієнт гармонійних спотворень трифазного частотного перетворювача ATV71H075N4Z

Режим АД	50Гц, β = 0%	50Гц, β=100%	50Гц, β=125%	25Гц, β=100%
THD	2,042	1,545	1,497	2,082

Аналіз отриманих спектрів гармонійних складових показує, що у спектральному складі вхідного струму наявні тільки непарні гармоніки, серед яких найбільший вплив здійснюють 5-та та 7-ма гармоніки, особливо у режимі навантаження. Коефіцієнт гармонійних спотворень знижується із підвищенням навантаження частотного перетворювача, тоді як зменшення вихідної частоти призводить до його підвищення

Одним із найбільш ефективних методів зменшення гармонійних спотворень, а також підвищення коефіцієнта потужності, є використання коректорів коефіцієнта потужності (PFC). Ці пристрої, що працюють за принципом імпульсних перетворень, відзначаються високою ефективністю та низькими втратами. Окрім покращення форми струму та підвищення коефіцієнта потужності, вони забезпечують стабілізацію напруги у колі постійного струму, що особливо важливо при різких коливаннях напруги живлення.

Висновки

Проведені дослідження дозволили визначити рівні коефіцієнтів гармонійних спотворень вхідного струму частотного перетворювача та оцінити способи їх компенсації. Запропоновано використання коректорів коефіцієнта потужності (PFC) у колі постійного струму, що дозволяє зменшити гармонійні спотворення, підвищити коефіцієнт потужності та стабілізувати напругу живлення інвертора. Реалізація цих заходів сприяє покращенню енергоефективності та надійності систем електроприводу.

Література

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

2. Сінчук О. М. Аналіз сучасного стану та перспектив коригування енергетичного балансу підприємств гірничодобувної галузі / О. М. Сінчук, С. М. Бойко, О. А. Жуков, А. Б. Сьомочкін, Г. Ю. Риков // Вісник ВПІ. – 2021. – Вип. 4. – С. 56–61.

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

4. Aspects of implementation of intelligent control systems at infrastructure, energy and transport facilities : monograph / S. M. Boiko, I. V. Kasatkina, T. F. Beridze, O. A. Zhukov, M. A. Nozhnova. – Warsaw : iScience Sp. z.o.o., 2024. – 205 p.

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

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

7. Safronov P. S. Dependence of input current quality on number of phases of multiphase interleaved PFC / P. S. Safronov, I. V. Bondarenko, O. F. Bondarenko, V. M. Sydorets // Proceedings of IEEE ELNANO Conference. – 2015. – P. 478–480.

8. Contemporary frequency converters in electric drive systems : tutorial / M. V. Zagirnyak, T. V. Korenkova, A. P. Kalinov, A. I. Gladyr, V. G. Kovalchuk. – 2nd edition, revised and corrected. – Kharkiv : Publisher “Tochka”, 2017. – 206 p.

9. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.

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

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

References

1. Elektroenerhetyka Ukrainy. Struktura, keruvannia, innovatsii : monohrafiia / I. V. Khomenko, O. A. Plakhtii, V. P. Nerubatskyi, I. V. Stasiuk. – Kharkiv : NTU «KhPI», TOV «Planeta-Print», 2020. – 132 s.

2. Sinchuk O. M. Analiz suchasnoho stanu ta perspektyv koryhuvannia enerhetychnoho balansu pidpryiemstv hirnychodobuvnoi haluzi / O. M. Sinchuk, S. M. Boiko, O. A. Zhukov, A. B. Somochkin, H. Yu. Rykov // Visnyk VPI. – 2021. – Vyp. 4. – S. 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, No. 1. – P. 71–77.

4. Aspects of implementation of intelligent control systems at infrastructure, energy and transport facilities : monograph / S.

M. Boiko, I. V. Kasatkina, T. F. Beridze, O. A. Zhukov, M. A. Nozhnova. – 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. Rohal V. V. Doslidzhennia spektru vkhidnoho strumu vysokochastotnykh korektoriv koefitsiienta potuzhnosti / V. V. Rohal, Yu. S. Demchenko // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. – № 5. – S. 80–82.

7. Safronov P. S., Bondarenko I. V., Bondarenko O. F., Sydorets V. M. Dependence of input current quality on number of phases of multiphase interleaved PFC // Proceedings of IEEE ELNANO Conference. – 2015. – P. 478–480.

8. Contemporary frequency converters in electric drive systems : tutorial / M. V. Zahirniak, T. V. Korenkova, A. P. Kalinov, A. I. Hladyr, V. G. Kovalchuk. – 2nd edition, revised and corrected. – Kharkiv : Publisher "Tochka", 2017. – 206 p.

9. Modeliuvannia elektromekhanichnykh system : pidruchnyk / O. P. Chornyi, A. V. Luhovoi, D. Y. Rodkin, H. Yu. Sysiuk, O. V. Sadovoi. – Kremenchuk, 2001. – 410 s.

10. Tolochko O. I. Modeliuvannia elektromekhanichnykh system. Matematychne modeliuvannia system asynkhronnoho elektropryvodu : navch. posib. / O. I. Tolochko. – Kyiv : NTUU «KPI», 2016. – 150 s.

11. Dovhan S. M. Doslidzhennia system elektropryvoda metodamy matematychnoho modeliuvannia : navch. posib. / S. M. Dovhan. – Dnipropetrovsk : NHA Ukrainy, 2001. – 137 s.