

**КУРЛЯК ПЕТРО ОМЕЛЯНОВИЧ** ✉ – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; м. Івано-Франківськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8113-5211>; e-mail: [petro.kurlyak@nung.edu.ua](mailto:petro.kurlyak@nung.edu.ua).

**БАЦАЛА ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; м. Івано-Франківськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4964-407X>; e-mail: [batsala2012@gmail.com](mailto:batsala2012@gmail.com).

**ФЕДОРІВ МИХАЙЛО ЙОСИПОВИЧ** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; м. Івано-Франківськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8917-4159>; e-mail: [fedorivm@ukr.net](mailto:fedorivm@ukr.net).

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У статті розглянуто актуальну науково-технічну проблему впливу несинусоїдної напруги живлення на режими роботи асинхронного електроприводу, що має особливе значення для сучасних промислових електротехнічних комплексів із великою кількістю нелінійних навантажень, силових напівпровідникових перетворювачів, частотно-регульованих приводів та іншого обладнання, яке спричиняє погіршення якості електроенергії. Для формування несинусоїдної напруги використано розклад періодичної функції у ряд Фур'є з урахуванням першої, третьої та п'ятої гармонічних складових. З метою відображення таких процесів побудовано підмодель генератора несинусоїдної напруги методом Bond Graph, яка дозволяє змінювати амплітуди та початкові фази окремих гармонік і, відповідно, імітувати різні типи спотворень у мережі живлення. Моделювання виконано для високовольтного асинхронного електродвигуна ВАО2-400LB-2У2. У результаті дослідження отримано осцилограми гармонічних складових напруги, спотворених трифазних напруг живлення, струмів статора та залежність електромагнітного моменту за умов живлення несинусоїдною напругою. Практична цінність дослідження полягає в тому, що запропонована Bond Graph модель із підмоделлю генератора несинусоїдної напруги дозволяє прогнозувати миттєві значення струмів, амплітуди та початкові фази гармонічних складових у випадку невідповідності параметрів електроенергії нормативним показникам якості. Отримані результати можуть бути використані для оцінювання чутливості асинхронних електроприводів до гармонічних спотворень, обґрунтування вибору раціональних режимів експлуатації, а також розроблення рекомендацій щодо впровадження пасивних, активних і гібридних фільтро-компенсувальних пристроїв, статичних синхронних компенсаторів та динамічних відновлювачів напруги для підвищення якості електроенергії. Застосування таких рішень сприятиме зменшенню гармонічних спотворень, стабілізації електромагнітного моменту, зниженню теплових перевантажень, підвищенню енергоефективності та забезпеченню надійної роботи високовольтних асинхронних електроприводів у реальних умовах промислових електричних мереж.

**Ключові слова:** Bond Graph; генератор несинусоїдної напруги; асинхронний електропривід; режими роботи.

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку силової електроніки та автоматизованих систем якість електроенергії в електромережах зазнає суттєвого погіршення. Зростання кількості нелінійних навантажень, таких як перетворювачі частоти, джерела безперебійного живлення, сучасні електронні пристрої та системи, призводить до появи гармонічних викривлень, перепадів напруги, провалів та інших аномалій [1, 2]. Несинусоїдність напруги живлення істотно впливає на роботу асинхронних електроприводів, оскільки призводить до спотворення електромагнітних процесів у двигуні. За умов наявності вищих гармонік напруги живлення в обмотках статора електродвигуна з'являються гармонічні складові струмів, які не беруть участі у створенні корисного обертового моменту, але підвищують діючі значення струму, спричиняючи додаткові втрати енергії у міді та сталі. Такі процеси впливають на підвищення температури обмоток і активних частин двигуна, що зменшує його енергоефективність та скорочує термін служби [3, 4].

Крім того, наявність гармонік напруги зумовлює виникнення паразитних електромагнітних моментів, які призводять до пульсацій обертового моменту та механічних вібрацій електроприводу. Це, у свою чергу, спричиняє додаткові динамічні навантаження на вал,

підшипникові вузли та інші елементи механічної системи, що негативно впливає на надійність і довговічність роботи обладнання. Особливо небезпечними є гармоніки, кратні частоті живлення, які можуть викликати резонансні явища в електромеханічній системі [3, 4].

Важливим аспектом є також вплив несинусоїдної напруги на електромагнітні втрати в магнітопроводі двигуна. Вищі гармоніки спричиняють збільшення втрат на гістерезис і вихрові струми, що додатково погіршує енергетичні показники електроприводу. При цьому коефіцієнт потужності знижується, а споживання реактивної потужності зростає, що призводить до неефективного використання електричної енергії в системі електропостачання [3, 4].

Слід зазначити, що в умовах сучасних промислових підприємств, зокрема в системах електроприводів насосних агрегатів магістральних трубопроводів, проблема якості електроенергії набуває особливої актуальності. Наявність значної кількості потужних електроприводів із напівпровідниковими перетворювачами формує складні електромагнітні взаємодії в мережі, що ускладнює забезпечення стабільних режимів роботи.

У зв'язку з цим актуальним є завдання дослідження впливу несинусоїдності напруги

© П. О. Курляк, Я. В. Бацала, М. Й. Федорів, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*  
**Конфлікт інтересів:** Автори заявили про відсутність конфлікту

живлення на режими роботи асинхронних електроприводів з метою визначення закономірностей зміни їх енергетичних та механічних характеристик. Це дозволяє обґрунтувати вибір раціональних режимів експлуатації, а також розробити ефективні технічні рішення щодо покращення якості електроенергії, зокрема шляхом застосування активних і пасивних фільтрів гармонік, компенсаторів реактивної потужності та сучасних систем керування електроприводами.

**Метою роботи** є розроблення підмоделі генератора несинусоїдної напруги для Bond Graph моделі асинхронного електроприводу з подальшим дослідженням впливу несинусоїдної напруги живлення на його режими роботи.

**Результати дослідження.** Для підвищення результативності роботи асинхронних електроприводних агрегатів доцільним є розроблення сучасних комп'ютерно-орієнтованих моделей, які забезпечують коректне відтворення складних фізичних процесів енергетичної взаємодії між складовими елементами електроприводу. Подальше дослідження таких моделей створює передумови для формування алгоритмів оптимального керування як усталеними, так і перехідними режимами, що виникають у процесі функціонування електроприводних систем.

З позицій системного аналізу асинхронні електроприводні агрегати доцільно розглядати як складні технічні об'єкти, структура яких охоплює кілька взаємопов'язаних підсистем різної фізичної природи: електричної, магнітної та механічної. Для аналізу подібних мехатронних систем [5] застосовують низку підходів до моделювання, зокрема метод багатополосників (Multipoles), метод блочних діаграм (Block Diagrams), метод об'єктних діаграм (Object Diagrams), а також метод графів зв'язків (Bond Graph).

Серед зазначених підходів особливе значення має уніфікований метод моделювання Bond Graph [6], який дає змогу досліджувати динамічні властивості мультидоменних систем на основі уніфікованого енергетичного підходу та стандартизованої системи позначень. Завдяки встановленню причинно-наслідкових зв'язків та спеціалізованого програмного забезпечення 20-sim, розробленого лабораторією автоматизованого керування Controllab інституту мехатроніки нідерландського університету Twente [7], даний метод забезпечує можливість автоматизованого формування системних рівнянь, перевірки коректності побудови моделей, а також графічного подання структури складних технічних об'єктів у наочній формі.

Для моделювання впливу несинусоїдної напруги на режими роботи асинхронного електроприводу застосовано метод Bond Graph [6], що є доцільним завдяки його універсальності та фізичній обґрунтованості. На відміну від багатьох інших методів моделювання, Bond Graph дозволяє візуалізувати не лише сигнальні взаємозв'язки, а й потоки енергії між елементами системи, та залишається актуальним і продовжує активно вдосконалюватися в сучасних дослідженнях складних електромеханічних і мехатронних систем.

Метод Bond Graph базується на принципах енергетичної взаємодії між підсистемами різної фізичної природи та дозволяє описувати електричні, магнітні й механічні процеси у єдиному енергетичному просторі. Використання методу Bond Graph забезпечує зручність побудови узагальненої структури моделі асинхронного електроприводу, автоматичне формування рівнянь стану та можливість урахування нелінійностей і перехідних процесів, що виникають під впливом вищих гармонік напруги живлення.

Для відображення динамічної поведінки будь-яких мультидоменних систем методом Bond Graph застосовують узагальнені змінні: зусилля ( $e$ ), потоку ( $f$ ), інерції ( $p$ ), зміщення ( $q$ ), потужності ( $P$ ) та енергії ( $E$ ). Встановлені наступні базові співвідношення між цими змінними [6]:

1.  $e(t), f(t)$ , – відповідно величина зусилля та потоку, добуток яких дає миттєву потужність  $P(t)$ , що протікає між двома портами. У динамічній системі зусилля і потік змінюються, отже і потужність змінюється в часі

$$P(t) = e(t)f(t). \quad (1)$$

2.  $p(t)$ , – величина інерції, що визначається як інтеграл по часу від зусилля

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t)dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt. \quad (2)$$

3.  $q(t)$  – величина зміщення, яка визначається як інтеграл по часу від змінної потоку

$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt. \quad (3)$$

4.  $E(t)$  – величина енергії, яка передається через порт елемента і визначається як інтеграл по часу від потужності  $P(t)$

$$E(t) = \int_{t_0}^t P(t)dt = \int_{t_0}^t (e(t)f(t))dt. \quad (4)$$

Для графічного відображення моделей мультидоменних систем метод Bond Graph використовує стандартний набір із 9 елементів [6]. Їх можна поділити на три категорії: одно-, дво- та багатопортові елементи. Зображають елементи комбінацією букв (мнемонічними кодами), вказуючи на вид елемента. Дані елементи, відповідно до своєї фізичної поведінки, розділяють на наступні 5 груп:

- джерел (граничних умов) –  $Se, Sf$ ;
- збереження (відповідно до закону збереження енергії) –  $I, C$ ;
- незворотнього перетворення (теплової дисипації енергії в довкілля) –  $R$ ;
- двостороннього зворотнього перетворення (взаємозв'язки між підсистемами) –  $TF, GY$ ;
- розподілу (взаємозв'язки в межах підсистеми) –  $0, 1$ .

До першої групи відносять однопортові активні елементи  $Se$ - та  $Sf$ -типу.  $Se$  – це джерело зусилля, що прикладається до інших елементів системи, в той час як  $Sf$  – джерело потоку, напрямленого в цю систему.

До другої групи відносять однопортові пасивні енергозберігаючі елементи  $C$ - та  $I$ -типу, які резервують всі види вільної енергії. Накопичення вільної енергії характеризують двома типами змінних  $q$ - і  $p$ -типу, які є змінними стану системи.

В елементах  $C$ -типу, в результаті надходження до них потоку  $f$  із мережі, накопичуються змінні  $q$ -типу. Охарактеризувати такий процес можна диференціальним рівнянням балансу, яке утворює першу частину системи конструктивних рівнянь (5) елемента зберігання. У іншій частині цієї системи рівнянь, змінна стану  $q$  пов'язана із зусиллям  $e$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= f, \\ e &= \phi(q) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аналогічно в елементах  $I$ -типу дія зусилля  $e$  призводить до накопичення змінних  $p$ -типу. Цей процес описується наступною системою конструктивних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= e \\ f &= \phi(p) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

До третьої групи відносять однопортовий пасивний елемент  $R$ -типу, який відображає дисипацію вільної енергії у довкілля. Конструктивним рівнянням даного елемента є алгебраїчне співвідношення між зусиллям і потоком

$$e = Rf. \quad (7)$$

До четвертої групи відносять два двопортові пасивні елементи перетворення енергії – це трансформатор  $TF$  та гіратор  $GY$ , які служать для відображення зв'язку між підсистемами однієї та різної фізичної природи.

В ідеальному трансформаторі  $TF$  енергія не зберігається і не розсіюється, а лише перетворюється. Внаслідок такого перетворення, зусилля трансформуються в зусилля, а потоки в потоки. Такий перетворювач характеризується тільки одним безрозмірним параметром  $n$ -коефіцієнтом трансформації, який є необхідним для опису трансформації зусиль і потоків

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= ne_2 \\ f_2 &= nf_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Прикладом такого елемента є трансформатори струму та напруги в електричній мережі.

Гіратор  $GY$  представляє перетворення енергії між різними фізичними областями. Прикладом такого перетворювача є електричний двигун, насос, турбіна тощо. Охарактеризувати дане перетворення можна гіраторним зв'язком, за допомогою рівняння

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= rf_2 \\ e_2 &= rf_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На відміну від коефіцієнта трансформації, коефіцієнт гірації  $r$  має фізичну розмірність, оскільки він відображає відношення між зусиллям і потоком.

До п'ятої групи відносять багатопортові елементи розподілу, які характеризують зв'язки між вищезазначеними елементами в межах однієї підсистеми. Існують два види таких зв'язків, а саме  $\theta$  і  $I$ -сполучення.

$\theta$ -сполучення описується першим законом Кірхгофа і представляє вузол, в якому всі зусилля сполучених елементів є рівними між собою. Прикладом такого з'єднання є паралельний зв'язок в електричному колі. За законом збереження енергії алгебраїчна сума потоків сполучених елементів рівна нулю. Енергетичний напрям (тобто напрям половини стріли) визначають за напрямом потоків.

$I$ -сполучення описується другим законом Кірхгофа і володіє властивостями послідовного сполучення в електричному колі, в якому всі потоки сполучених елементів є рівні, а енергетичний напрям визначають за напрямом зусиль.

У випадку моделювання нелінійних елементів системи до позначення вищезазначених основних елементів додається літера  $M$  (модульований елемент). Вона символізує про те, що конструктивні рівняння таких елементів залежать від зовнішнього сигналу.

Проведемо моделювання впливу несинусоїдної напруги живлення на режими роботи асинхронного електроприводу за допомогою методу Bond Graph.

Дослідження впливу періодичної несинусоїдальної напруги живлення на режими роботи асинхронних електроприводів значно спрощується, якщо криву напруги представити у вигляді ряду Фур'є:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + \\ &+ U_{m2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots = \\ &= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k), \end{aligned} \quad (10)$$

де  $U_0$  – стала складова (нульова гармоніка);

$U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$  – основна або перша гармоніка;

$U_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k)$  – вища гармоніка  $k$ -го порядку;

$\omega = \frac{1}{T}$  – основна частота (кутова);

$T$  – період несинусоїдної функції.

Від форми ряду (10) легко перейти до іншої форми (11), врахувавши значення синуса суми  $(k\omega t + \varphi_k)$ :

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cdot \cos \varphi_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cdot \sin \varphi_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k) = \end{aligned}$$

$$= U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \cos(k\omega t) \quad (11)$$

$$\text{де } A_k = U_{mk} \cdot \cos \varphi_k;$$

$$B_k = U_{mk} \cdot \sin \varphi_k.$$

Періодичні несинусоїдальні криві, які мають певні види симетрії, значно спрощують процес розкладання у ряд Фур'є, оскільки деякі гармоніки автоматично виключаються. Якщо припустити, що несинусоїдна крива напруги живлення симетрична відносно осі абсцис, то під час розкладання таких кривих рядом Фур'є нульова і парні гармоніки стають рівними нулю, а сам ряд має вигляд:

$$u(t) = A_1 \cdot \sin(\omega t) + B_1 \cdot \cos(\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t) + B_3 \cdot \cos(3\omega t) + A_5 \cdot \sin(5\omega t) + B_5 \cdot \cos(5\omega t) \quad (12)$$

Рівняння (12) покладено в основу розроблення підмоделі генератора несинусоїдної напруги (рис. 1) методом Bond Graph. Дана підмодель складається із семи розрахункових блоків та трьох елементів. Перші три розрахункові блоки 1-harmonic; 3-harmonic; 5-harmonic, задають відповідно першу, третю та п'яту гармонічну складову несинусоїдної напруги. За необхідності кількість гармонічних складових можна збільшити. Далі на розрахунковому блоці Sum відбувається сумування згенерованих гармонічних складових функцій (12), значення якої відповідно подається на клемі трифазного джерела напруги.

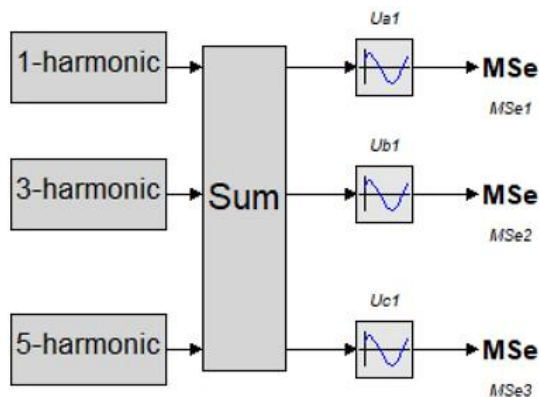


Рисунок 1 – Підмодель генератора несинусоїдної напруги

Далі проводимо моделювання впливу періодичної несинусоїдальної напруги живлення на режими роботи асинхронного електроприводу високовольтного електродвигуна ВАО2-400LB-2У2 за допомогою розробленої Bond Graph моделі [8]. Джерелом спотворення буде слугувати сигнали підмоделі джерела-генератора несинусоїдної форми напруги (рис. 1). Побудована підмодель дозволяє змінювати амплітуди та початкові фази окремих гармонік, тим самим моделюючи різні типи спотворень, які можуть виникати в електричних мережах. Це створює умови для оцінювання чутливості електроприводу до окремих частотних компонент напруги живлення.

Встановлюємо, згідно виразу (12), першу, третю та п'яту гармонічні складові напруги, осцилограми яких зображені на рис. 2. Спотворені форми трифазних несинусоїдних напруг живлення (рис. 3) подаємо на затискачі високовольтного електродвигуна ВАО2-400LB-2У2 асинхронного електроприводу. В результаті проведеного моделювання впливу несинусоїдної напруги живлення для номінального режиму роботи електродвигуна отримуємо гармонічні складові струмів, значення яких в усталеному режимі роботи зображені на рис. 4, та залежність електродинамічного моменту, зображеного на рис. 5.

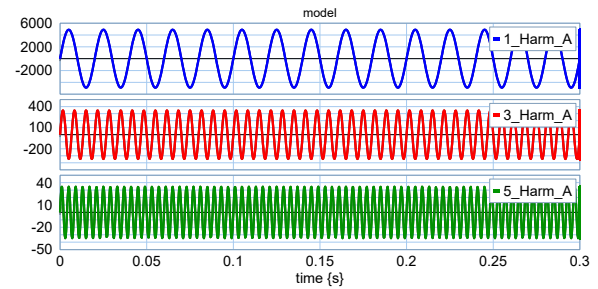


Рисунок 2 – Осцилограми першої, третьої та п'ятої гармонік напруги у фазі А

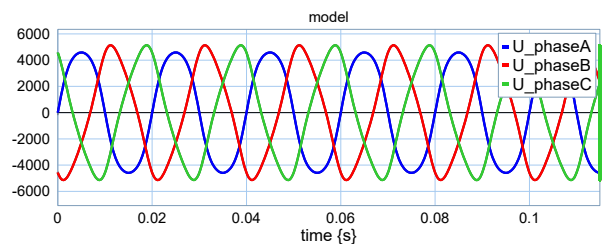


Рисунок 3 – Несинусоїдні трифазні напруги живлення асинхронного електроприводу

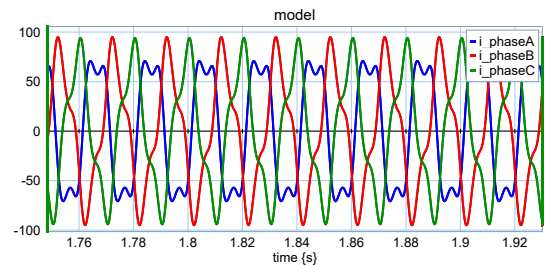


Рисунок 4 – Гармонічні складові струмів статора високовольтного електродвигуна ВАО2-400LB-2У2 в усталеному режимі роботи за умови живлення несинусоїдною напругою

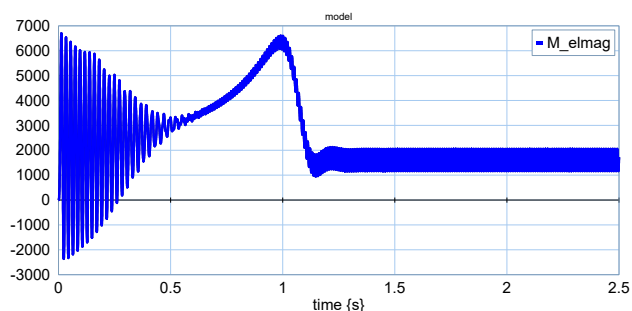


Рисунок 5 – Електромагнітний момент асинхронного електроприводу за умови живлення несинусоїдною напругою

Проблема компенсації вищих гармонік у системах середньої напруги (6–10 кВ) має особливе значення, оскільки саме на цьому рівні розподільчих мереж працюють потужні електроприводи, перетворювачі частоти та інше електрообладнання, яке одночасно є як джерелом, так і споживачем гармонічних струмів. На відміну від низьковольтних систем, де пристрої фільтрації вищих гармонік можуть бути реалізовані з використанням відносно простих пасивних LC-ланцюгів, у мережах середньої напруги необхідно враховувати значення струмів, вплив параметрів трансформаторів та можливість виникнення резонансних явищ [9].

Основною метою компенсації вищих гармонік у системах середньої напруги є зменшення рівня спотворень напруги та струму до нормативних значень [10], забезпечення стабільності електромагнітного моменту електроприводу, зниження теплових перевантажень і підвищення енергоефективності системи. Для досягнення даних цілей застосовуються пасивні, активні та комбіновані (гібридні) фільтрокомпенсуючі пристрої.

Пасивна фільтрація базується на використанні резонансних LC-ланцюгів, налаштованих на певну частоту гармоніки. Такі фільтри підключаються паралельно до мережі через узгоджувальний трансформатор або безпосередньо до шин середньої напруги. Найпоширенішими є фільтри типу single-tuned (налаштовані на одну гармоніку, зазвичай 5-ту або 7-му) та high-pass (широкопasmові фільтри, що забезпечують демпфування кількох високих гармонік). Їхнє застосування дозволяє знизити гармонічні складові струму в точці приєднання електроприводу, стабілізувати напругу та зменшити реактивне навантаження мережі. Однак основним недоліком пасивних фільтрів є залежність їх ефективності від режимів роботи мережі. При зміні частоти гармонічних складових або конфігурації системи вони можуть втрачати налаштування, а в окремих випадках створювати паралельні резонанси, що призводить до зростання напругових спотворень. Тому пасивні фільтри ефективні переважно в системах із відносно стабільним спектром гармонік [11].

Для динамічного придушення гармонічних складових застосовуються активні фільтри (Active

Power Filters, APF), що працюють на принципі інжекції компенсуючих струмів. Такі пристрої використовують силові напівпровідникові перетворювачі (Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT) або Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)), які генерують струм із протилежною фазою до гармонічної складової струму навантаження. У мережах середньої напруги ці системи зазвичай реалізуються за схемою модульних каскадних інверторів (Modular Multilevel Converter, MMC) або через з'єднання декількох низьковольтних активних фільтрів через узгоджувальні трансформатори. Активні фільтри забезпечують високу динамічну точність, автоматично підлаштовуються під змінний спектр гармонік і можуть одночасно виконувати функції компенсації реактивної потужності та балансування фаз. Проте їх застосування у системах середньої напруги потребує складних схем охолодження, надійної ізоляції та значних капітальних витрат [12].

Найбільш ефективними засобами компенсації вищих гармонік для високовольтних асинхронних електроприводів є гібридне поєднання пасивної та активної компенсації, де пасивна частина бере на себе основне навантаження зі зниження енергії основних гармонік (5-ї, 7-ї), а активна частина коригує високочастотні залишкові компоненти та змінний спектр. Така структура поєднує енергоефективність пасивних фільтрів з гнучкістю активних систем, забезпечуючи зменшення загального гармонічного спотворення (Total Harmonic Distortion, THD) напруги до рівня нижче 3–5 % навіть за умов нестабільного навантаження.

Для систем, де необхідна підтримка якості напруги на рівні шин живлення, застосовуються високовольтні компенсуючі пристрої на основі силової електроніки — STATCOM (Static Synchronous Compensator) та DVR (Dynamic Voltage Restorer). Пристрій STATCOM підключається паралельно до мережі й генерує змінну реактивну потужність, що компенсує миттєві спотворення струму. DVR, у свою чергу, встановлюється послідовно з лінією живлення та забезпечує підтримку амплітуди та форми напруги на клеммах споживача [13].

Застосування таких пристроїв у системах середньої напруги дозволяє ефективно усунути як гармонічні, так і негармонічні спотворення (провали, перенапруги, несиметрію фаз), а також стабілізувати електромагнітні режими потужних приводів. STATCOM і DVR відзначаються високою швидкістю, широким частотним діапазоном компенсації та можливістю інтеграції в системи автоматичного керування енергетичними комплексами.

**Висновки.** Розроблена методом Bond Graph модель асинхронного електроприводу із підмоделлю генератора несинусоїдних напруг дозволяє здійснювати прогноз як миттєвих значень струмів в

ній, так і амплітуд та початкових фаз гармонійних складових у разі невідповідності електроенергії встановленим показникам її якості. Одержані результати моделювання впливу несинусоїдної напруги на режими роботи високовольтних асинхронних електроприводів дають змогу розробляти рекомендації щодо ефективного впровадження засобів компенсації вищих гармонік. Це сприятиме підвищенню надійності, зниженню експлуатаційних витрат та забезпеченню ефективного функціонування високовольтних електроприводів в умовах реальних мереж.

### Список літератури

- Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study / Ł. Michalec et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 12. 3665. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123665>.
- Harmonics: the distortion in supplied waveform – causes and remedies / N. B. Mirajkar et al. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2023. Vol. 12, no. 5. P. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2023.1205.005>.
- Якість електроенергії та її вплив на електроспоживання і надійність роботи електроустановки. PATRIOT-NRG Національний портал з енергозбереження. URL: <https://patriot-nrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrospozhyvannya-i-nadiynist-roboty>.
- Verovkin O. Influence of higher harmonics on power quality in industrial electrical networks. *Information technologies in metallurgy and machine building (ITMM 2025)*: Materials of Scientific and Technical International Conference, Dnipro, Ukraine, 10–11 April 2025. Dnipro, 2025. P. 485–489. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.086>.
- Bishop R. H. *The mechatronics handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002. 1272 p.
- Karnopp D. C., Margolis D. L., Rosenberg R. C. *System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems*. 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118152812>.
- 20-sim. Controllab. URL: <https://www.controllab.nl/technology/software/20-sim/>.
- Костинин В. С., Курляк П. О. Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. № 4 (30). С. 32–37.
- IEEE Std 519-2022. IEEE standard for harmonic control in electric power systems. Replaces IEEE Std 519-2014; effective from 2022-08-05. Official edition. IEEE, 2022. 31 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2022.9848440>.
- ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. На заміну ДСТУ EN 50160:2014; чинний від 2023-12-08. Вид. офіц. Київ, 2023.
- Nassif A. B., Xu W. Passive harmonic filters for medium-voltage industrial systems: practical considerations and topology analysis. *2007 39th North American Power Symposium*, Las Cruces, NM, USA, 30 September – 2 October 2007. 2007. P. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.1109/naps.2007.4402326>.
- Demirdelen T., Kayaalp R. I., Tumay M. A modular cascaded multilevel inverter based shunt hybrid active power filter for selective harmonic and reactive power compensation under distorted/unbalanced grid voltage conditions. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2016. Vol. 6, no. 5. P. 1133–1138. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.777>.
- Бурбело М., Бабенко О., Лебедь Д. Аналіз процесу керування STATCOM за швидких змін напруги. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. № 1 (150). С. 284–291. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.35>.
- Ł. Michalec, M. Jasiński, T. Sikorski, Z. Leonowicz, Ł. Jasiński, and V. Suresh, “Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study,” *Energies*, vol. 14, no. 12, Jun. 2021, Art. no. 3665, doi: <https://doi.org/10.3390/en14123665>
- N. B. Mirajkar, R. M. Dharaskar, T. G. Kazi, R. R. Burte, and R. R. Jadhav, “Harmonics: The distortion in supplied waveform – causes and remedies,” *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, pp. 39–44, May 2023, doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2023.1205.005>
- “Yakist elektroenerhii ta yii vplyv na elektrozpozhyvannya i nadiynist roboty elektroustatkuvannya [Power quality and its impact on electricity consumption and the reliability of electrical equipment].” PATRIOT-NRG International energy saving portal. [Online]. Available: <https://patriot-nrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrozpozhyvannya-i-nadiynist-roboty> (in Ukrainian)
- O. Verovkin, “Influence of higher harmonics on power quality in industrial electrical networks,” in *Information Technologies in Metallurgy and Machine Building (ITMM 2025)*, Dnipro, Ukraine, Apr. 10–11, 2025. Dnipro: Ukrainian State Univ. Sci. Technol., 2025, pp. 485–489, doi: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.086>
- R. H. Bishop, *The Mechatronics Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118152812>
- “20-sim.” Controllab. [Online]. Available: <https://www.controllab.nl/technology/software/20-sim/>
- V. S. Kostyshyn and P. O. Kurlyak, “Bond Graph model asynkronnoho dvyhuna z vrakhuvanniam nasychennia mahnitoprovodu ta efektu vytisnennia strumu v rotorі [Bond Graph model of an asynchronous motor, taking into account magnetic circuit saturation and the current displacement effect in the rotor],” *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, no. 4 (30), pp. 32–37, 2011. (in Ukrainian)
- IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Std 519-2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2022.9848440>
- Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160:2022, CENELEC, 2022.
- A. B. Nassif and W. Xu, “Passive harmonic filters for medium-voltage industrial systems: Practical considerations and topology analysis,” in *2007 39th North American Power Symposium*, Las Cruces, NM, USA, Sep. 30–Oct. 2, 2007. IEEE, 2007, pp. 301–307, doi: <https://doi.org/10.1109/naps.2007.4402326>
- T. Demirdelen, R. I. Kayaalp, and M. Tumay, “A modular cascaded multilevel inverter based shunt hybrid active power filter for selective harmonic and reactive power compensation under distorted/unbalanced grid voltage conditions,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 6, no. 5, pp. 1133–1138, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.777>
- M. Burbelo, O. Babenko, and D. Lebed, “Analysis of STATCOM control process under rapid voltage changes,” *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 1 (150), pp. 284–291, 2025, doi: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.35>

Надійшла (Received) 06.03.2026

Прийнята (Accepted) 12.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

**KURLIAK PETRO** ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Head of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Ivano-Frankivsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8113-5211>; e-mail: [petro.kurliak@nunge.edu.ua](mailto:petro.kurliak@nunge.edu.ua).

**BATSALA YAROSLAV** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Ivano-Frankivsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4964-407X>; e-mail: [batsala2012@gmail.com](mailto:batsala2012@gmail.com).

**FEDORIV MYKHAILO** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Ivano-Frankivsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8917-4159>; e-mail: [fedorivm@ukr.net](mailto:fedorivm@ukr.net).

## MODELING THE INFLUENCE OF NONSINUSOIDAL SUPPLY VOLTAGE ON THE OPERATING MODES OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE

The article addresses a current scientific and technical problem related to the influence of nonsinusoidal supply voltage on the operating modes of an induction electric drive. This issue is of particular importance for modern industrial electrotechnical complexes with a large number of nonlinear loads, power semiconductor converters, variable-frequency drives, and other equipment that contributes to the deterioration of power quality. To generate the nonsinusoidal voltage, the expansion of a periodic function into a Fourier series was used, taking into account the first, third, and fifth harmonic components. To represent these processes, a submodel of a nonsinusoidal voltage generator was developed using the Bond Graph method. This submodel makes it possible to vary the amplitudes and initial phases of individual harmonics and, accordingly, to simulate different types of distortions in the supply network. The simulation was carried out for a high-voltage induction motor VAO2-400LB-2U2. As a result of the study, oscillograms of voltage harmonic components, distorted three-phase supply voltages, stator currents, and the dependence of electromagnetic torque under nonsinusoidal voltage supply conditions were obtained. The practical value of the study lies in the fact that the proposed Bond Graph model with a submodel of a nonsinusoidal voltage generator makes it possible to predict instantaneous current values, as well as the amplitudes and initial phases of harmonic components when the parameters of electrical energy do not comply with established power quality standards. The obtained results can be used to assess the sensitivity of induction electric drives to harmonic distortions, justify the selection of rational operating modes, and develop recommendations for the implementation of passive, active, and hybrid filter-compensating devices, Static Synchronous Compensator, and Dynamic Voltage Restorer to improve power quality. The application of such solutions will contribute to reducing harmonic distortions, stabilizing electromagnetic torque, decreasing thermal overloads, improving energy efficiency, and ensuring reliable operation of high-voltage induction electric drives under real industrial power network conditions.

**Keywords:** Bond Graph; nonsinusoidal voltage generator; induction electric drive; operating modes.