

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Слівінська Дарина Володимирівна

УДК 621.317

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Особливості гармонійної фільтрації в електроприводах із регульованою швидкістю
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Слівінська Д.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Слівінська Д.В. Особливості гармонійної фільтрації в електроприводах із регульованою швидкістю. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Однією з ключових проблем є поява гармонійних складових у струмах та напругах, що виникають через нелінійну роботу перетворювачів частоти, тиристорних випрямлячів та інших силових пристроїв. Накопичення гармоніки призводить до підвищених втрат, нагрівання електромашин, обмеження корисної потужності, спотворень сигналів вимірювальних систем і скорочення терміну служби обладнання. Робота має на меті систематизувати сучасні підходи до оцінки гармоніки у приводах із регульованою швидкістю.

Ключові слова. Перетворювачі частоти, спотворення, якість електроенергії, технічне обслуговування, фільтрація гармоніки.

ABSTRACT

Slivinska D.V. Features of harmonic filtering in adjustable speed electric drives. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

One of the key problems is the appearance of harmonic components in currents and voltages, which arise due to the non-linear operation of frequency converters, thyristor rectifiers, and other power devices. The accumulation of harmonics leads to increased losses, heating of electrical machines, limitation of useful power, distortion of measurement system signals, and reduced equipment lifespan. The work aims to systematize modern approaches to harmonic assessment in adjustable speed drives.

Keywords: Frequency converters, distortion, power quality, maintenance, harmonic filtering.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ	6
1.1 Загальні положення	6
1.2 Генерація гармонічних коливань	7
1.3. Синтез несинусоїдальної форми сигналу з використанням аналізу Фур'є	11
Висновок до першого розділу	14
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖУ	16
2.1 Генератори	18
2.2 Трансформатори	18
2.3 Асинхронні двигуни	19
2.4 Кабелі	20
2.5 Автоматичні вимикачі та запобіжники	21
2.6 Освітлення	22
2.7 Інші негативні наслідки гармоніки	23
Висновки по другому розділу	24
РОЗДІЛ 3 КОНТРОЛЬ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	26
3.1 Граничні значення емісії гармоніки згідно з ІЕС	27
3.2 Оцінка гармонічних складових системи	27
3.3 Методи для зменшення впливу гармонік на електромережу	28
Висновки по третьому розділу	35
ЗАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Гармонійна фільтрація в електроприводах із регульованою швидкістю є ключовим елементом забезпечення якісної експлуатації приводних систем і підвищення їхньої надійності. Сучасні перетворювачі частоти та інвертори формують напругу й струм зі значною кількістю гармонік, що негативно впливає на електромотор, мережеве середовище та керуючу електроніку. Тому застосування ефективних фільтрів гармонік має як технічне, так і економічне значення.

По-перше, характерні особливості електроприводів із регульованою швидкістю — змінна частота і форма напруги, імпульсні режими роботи силових перетворювачів — зумовлюють наявність високочастотних складових, гармоніки та широку спектральну щільність перешкод. Це ускладнює проектування фільтра: потрібно враховувати діапазон робочих частот, швидкість переходів і можливу взаємодію фільтра з вихідною ланкою інвертора та двигуном.

По-друге, вибір типу фільтра (пасивні, активні або гібридні) залежить від технічних вимог і економічних обмежень. Пасивні фільтри (LC- або LCL-структури) прості і надійні, але мають обмежену адаптивність до змін частоти та можуть створювати резонансні явища з мережею або двигуном. Активні фільтри забезпечують високу ефективність компенсації гармонік і регулювання в широкому діапазоні частот, але вимогливіші до керування і дорожчі. Гібридні рішення поєднують переваги обох підходів, забезпечуючи баланс між вартістю і якістю фільтрації.

По-третє, при проектуванні необхідно враховувати вплив фільтра на динаміку системи: затримки, фазові зрушення та зміни імпедансу можуть впливати на стабільність регулювання швидкості й контрольний контур приводу. Також важливі аспекти теплового навантаження, експлуатаційна довговічність і вимоги до технічного обслуговування.

Нарешті, нормативні вимоги та стандарти щодо якості електроенергії (наприклад, обмеження рівня гармоній) визначають мінімальні показники

ефективності фільтрації. У практиці досягається оптимальний результат шляхом системного підходу: аналізу спектра перешкод, вибору конструкції фільтра з урахуванням особливостей приводу, моделювання взаємодії та випробувань у реальних умовах.

Актуальність теми зумовлена широким застосуванням перетворювачів частоти, інверторів і керованих двигунів у промисловості, де нелінійні навантаження породжують високочастотні і низькочастотні гармоніки.

Мета кваліфікаційної роботи — дослідити особливості гармонійної фільтрації в електроприводах із регульованою швидкістю та обґрунтувати ефективні технічні рішення для забезпечення якісної електропостачальної та експлуатаційної сумісності систем.

Предмет дослідження — особливості гармонійної фільтрації в електроприводах із регульованою швидкістю.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Слівінська Д.В

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖУ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Слівінська Д. В., Тисячний А. Г.

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА АВТОМАТИЧНІ ВИМИКАЧІ ТА

ЗАПОБІЖНИКИ Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

1.1 Загальні положення

"Лінійним" навантаженням, підключеним до електричної мережі, визначається навантаження, яке споживає струм від джерела живлення, пропорційний прикладеній напрузі (наприклад, резистивне навантаження, лампи розжарювання тощо). Приклад форми сигналу напруги та струму лінійного навантаження показано на рис. 1.1.

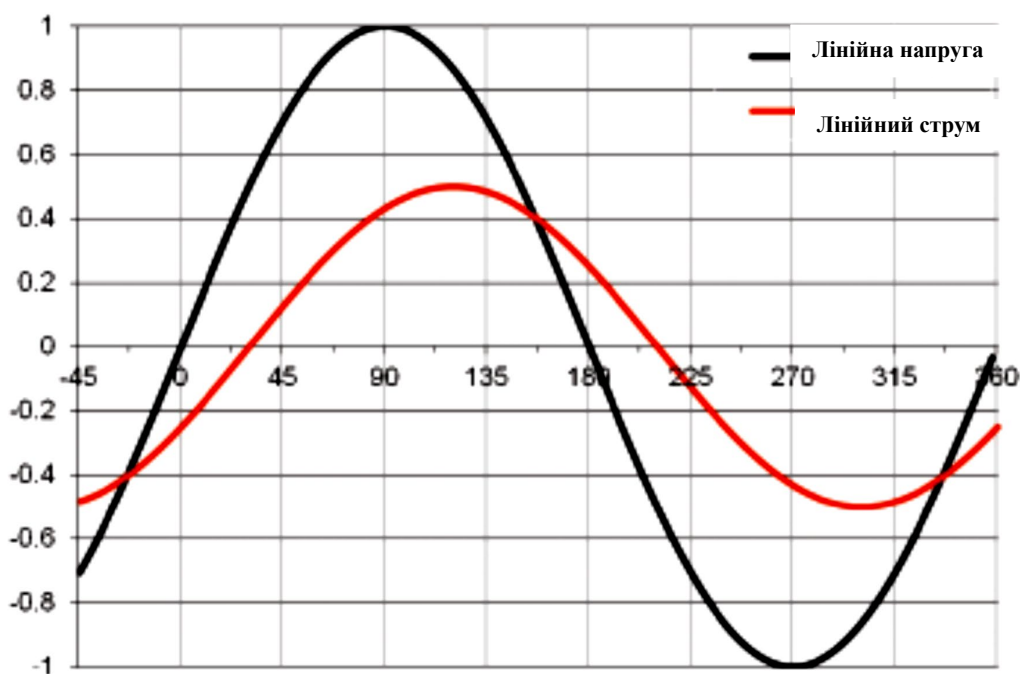


Рисунок 1.1 Напруга та струм лінійного навантаження

Навантаження вважається "нелінійним", якщо його імпеданс змінюється залежно від прикладеної напруги[1]. Через цю змінну величину імпедансу, струм, споживаний нелінійним навантаженням, також є нелінійним, тобто несинусоїдним за формою, навіть коли воно підключене до синусоїдного джерела напруги (наприклад, комп'ютери, приводи змінної частоти, газорозрядні лампи тощо). Приклад кривих напруги та струму нелінійного навантаження показано на рис. 1.2.

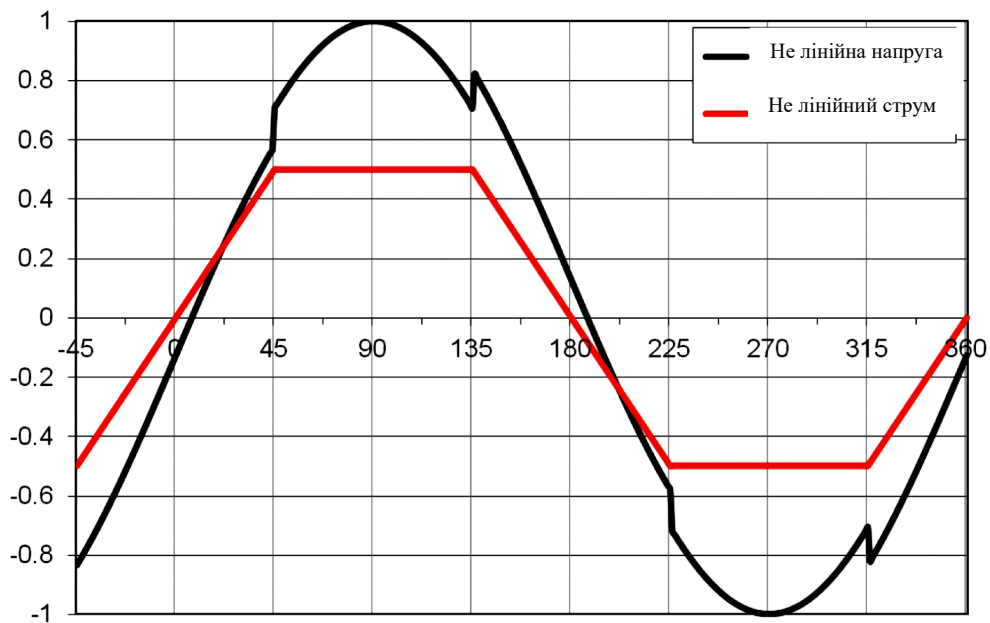


Рисунок 1.2 Напруга та струм нелінійного навантаження

Ці несинусоїдальні струми генерують гармонічні струми, які взаємодіють з імпедансом системи розподілу електроенергії, що призводить до нелінійних падінь напруги та, як наслідок, до спотворення напруги. Це спотворення може негативно впливати як на обладнання системи розподілу, так і на підключені навантаження, погіршуючи продуктивність та ефективність.

Стандарт IEEE 519-2022 визначає гармоніки як синусоїдальні компоненти, порядок яких більший за одиницю, у ряді Фур'є періодичної величини. Наприклад, у системі з частотою 50 Гц гармоніка 3-го порядку (також відома як "третя гармоніка") становить 150 Гц[2].

1.2 Генерація гармонічних коливань

Статичні перетворювачі потужності - це обладнання, що використовує напівпровідникові прилади для перетворення електроенергії з AC в DC, DC в DC, DC в AC та AC в AC; і є найбільшими нелінійними навантаженнями, підключеними до електричних енергетичних систем. Ці перетворювачі використовуються для різних цілей у промисловості, таких як приводи з регульованою швидкістю (або змінною частотою), джерела безперебійного живлення, імпульсні джерела живлення тощо. Ці статичні перетворювачі

потужності, які використовуються в різних сферах застосування, споживають нелінійні (тобто, несинусоїдальні) струми і спотворюють форму сигналу напруги живлення в точці загального приєднання (ТЗП)[3]. Це явище пояснюється тут з використанням рис. 1.1 і 1.2.

Згідно з IEEE 519-2022, ТЗП – це точка між власником або оператором системи та користувачем. ТЗП зазвичай приймається як точка в енергосистемі, найближча до користувача, де власник або оператор системи може запропонувати послуги іншим користувачам. Найчастіше, для обслуговування промислових споживачів (тобто виробничих підприємств) через виділений службовий трансформатор, ТЗП знаходиться на стороні високої напруги (ВН) трансформатора. Для комерційних споживачів (тобто офісних парків, торгових центрів тощо), що живляться через загальний службовий трансформатор, ТЗП зазвичай знаходиться на стороні низької напруги (НН) службового трансформатора. В цілому, ТЗП – це точка в публічній системі електропостачання, електрично найближча до певного навантаження, до якої інші навантаження підключені або можуть бути підключені, і знаходиться вище за течією від розглянутої установки.

На рис. 1.3(а) показаний однофазний повно хвильовий діодний містковий випрямляч, що живить навантаження, яке містить індуктивність (L_{dc}) і опір (R_{dc}). Імпеданс джерела живлення змінного струму представлений індуктивністю (L_{ac}).

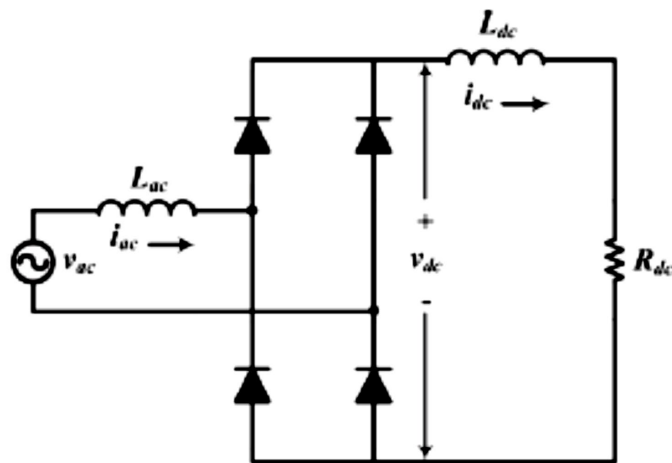


Рисунок 1.3 (а) Однофазний двопівперіодний випрямляч

На рис. 1.3(b) показано постійний струм навантаження i_{dc} без пульсацій, що передбачає наявність значної індуктивності навантаження, а також відповідний змінний вхідний струм i_{ac} цього випрямляча[4]. Трапецієподібна форма змінного струму виникає через кінцеву індуктивність лінії змінного струму і вказує на період перекриття або комутації, протягом якого два діоди проводять одночасно, створюючи тимчасове коротке замикання між ними. В ідеальному сценарії, якщо ця індуктивність лінії змінного струму дорівнює нулю (тобто, нескінченне джерело живить випрямляч), перехід змінного струму був би миттєвим, що призвело б до прямокутної форми хвилі.

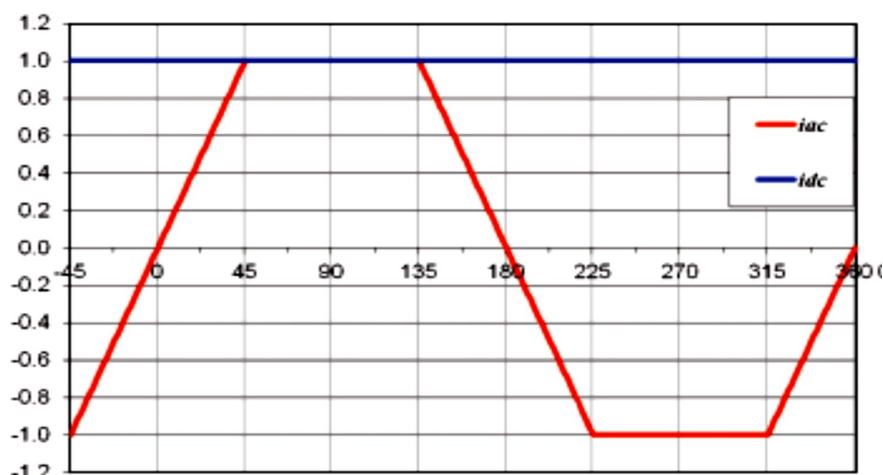


Рисунок 1.3 (б) Струм навантаження постійного струму та струм живлення змінного струму

На рис. 1.4(a) зображено однолінійне представлення системи розподілу електроенергії з точкою спільного приєднання (ТСП). Напруга джерела/системи v_s вважається чисто синусоїдальною, а опір системи/джерела представлений індуктивністю L_s .

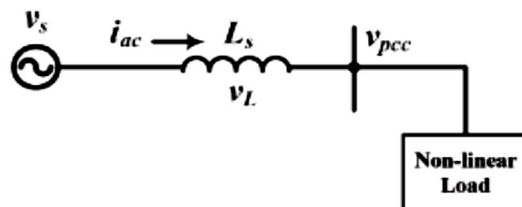


Рисунок 1.4 (a) Принципова однолінійна схема системи розподілу електроенергії

Напругу в точці спільного приєднання (ТСП), v_{PCC} , можна отримати, віднімаючи падіння напруги (v_L) на імпедансі системи внаслідок протікання нелінійного струму i_{ac} , як показано на рисунку 1.4(b).

$$v_{PCC} = (v_s - v_L) = \left\{ v_s - L_s \frac{d(i_{ac})}{dt} \right\} \quad (1.1)$$

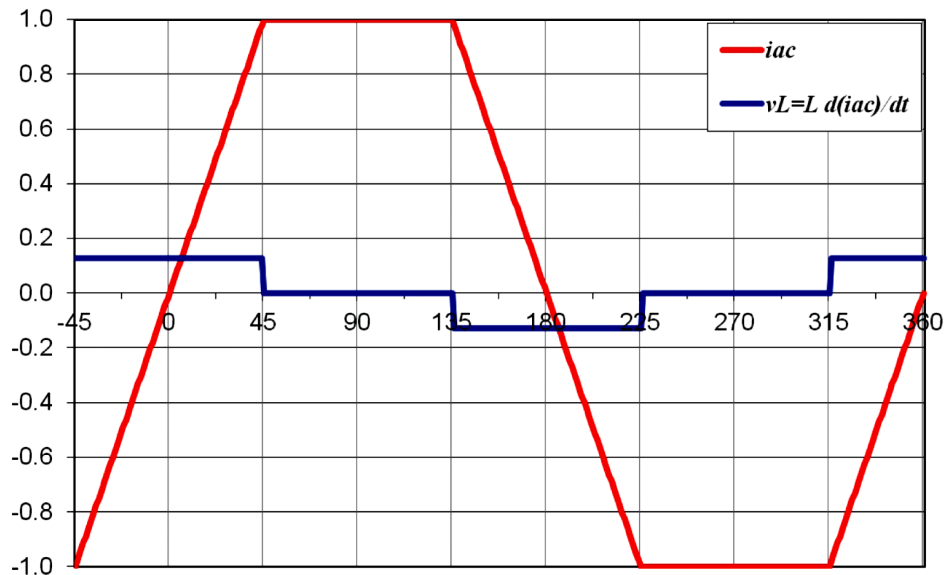


Рисунок 1.4 (б) Форма сигналу струму живлення змінного струму та падіння напруги

Рисунок 1.4(в) ілюструє спотворення форми напруги v_{PCC} , що виникає внаслідок протікання нелінійного струму через кінцевий імпеданс системи[5].

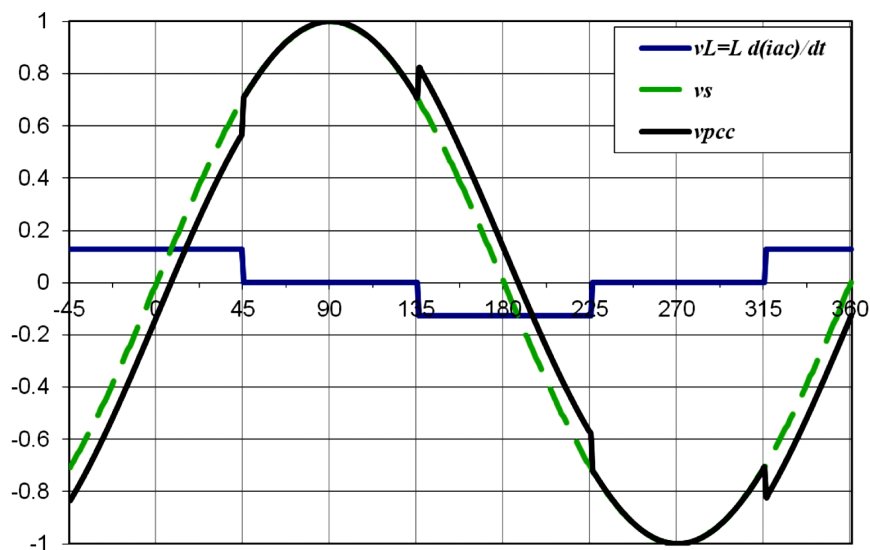


Рисунок 1.4 (в) Спотворена форма сигналу напруги на (ТСП)

Виймки (провали) у формі напруги є результатом комутаційної дії випрямляча. Як пояснювалося вище, в ідеальному сценарії, коли випрямляч живиться від нескінченного джерела, форма струму була б прямокутною, а провали напруги були б відсутні.

Ці несинусоїдальні величини (напруги та струми) можуть бути розкладені на синусоїдальні складові: основну частоту (тобто 50 або 60 Гц) та гармонічні складові. На рис. 1.5 показано гармонічний спектр до 50-го порядку для змінного струму «трапецієподібної» форми, зображеного на рис. 1.4(б), у відсотках від основного струму. Основна складова, I_1 (тобто 100% складова), навмисно пропущена на рисунку 1.3 для чіткості.

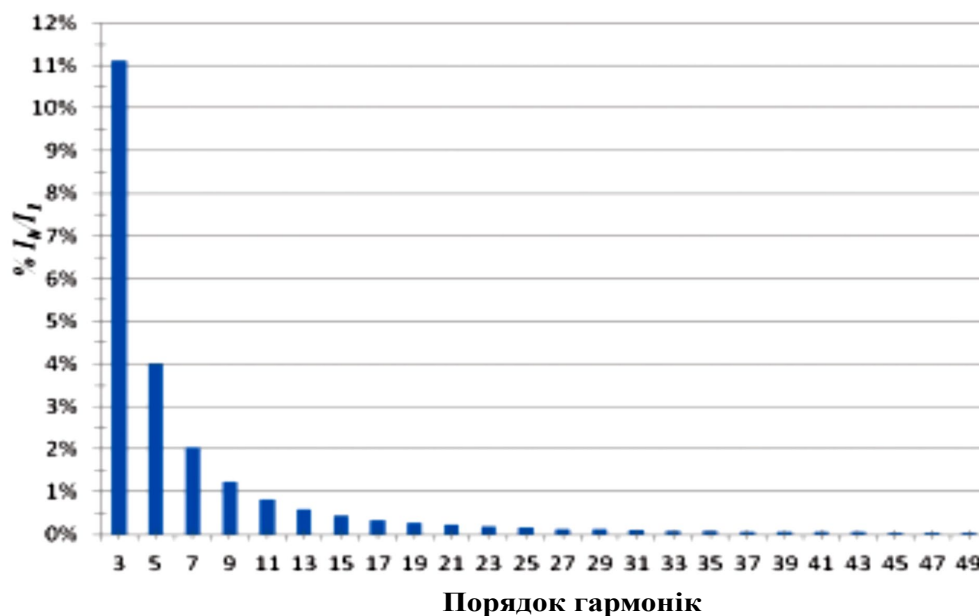


Рисунок 1.5 Гармонічний спектр змінного струму трапецієподібної форми, зображеного на рис. 1.4(б)

Наявність вищих гармонійних складових у сигналі призводить до більших спотворень, тобто сигнал більше відхиляється від синусоїдальної основної частоти. Ці гармонійні складові напруги та струму є цілими кратними основній частоті. Наприклад, у мережі 50 Гц 3-тя гармоніка становить 3×50 Гц (150 Гц), тоді як 5-та гармоніка становить 5×50 Гц (250 Гц), і так далі. Коли всі гармонійні струми об'єднуються з основною частотою, вони створюють

складну форму хвилі. На рис.1.6 показано приклад складної форми хвилі, що складається з основної частоти (1-ї гармоніки), 3-ї гармоніки та 5-ї гармоніки

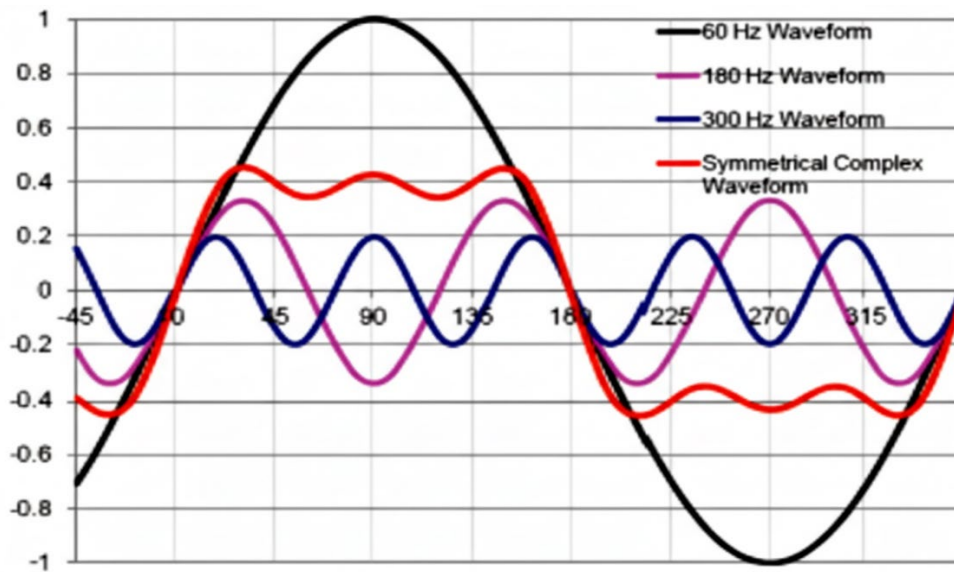


Рисунок 1.6 Створення симетричної складної форми хвилі

На рис. 1.6 представлено приклад симетричної складної форми сигналу, де позитивна та негативна частини ідентичні. Симетричні форми сигналу містять виключно "непарні" гармоніки (наприклад, 3-тя, 5-та, 7-ма тощо)[6].

На відміну від них, асиметричні форми сигналу демонструють різні позитивні та негативні частини, включаючи як "парні" гармоніки (наприклад, 2-га, 4-та, 6-та тощо), так і "непарні" гармоніки, часто супроводжуючись DC-складовими (компонентами постійного струму).

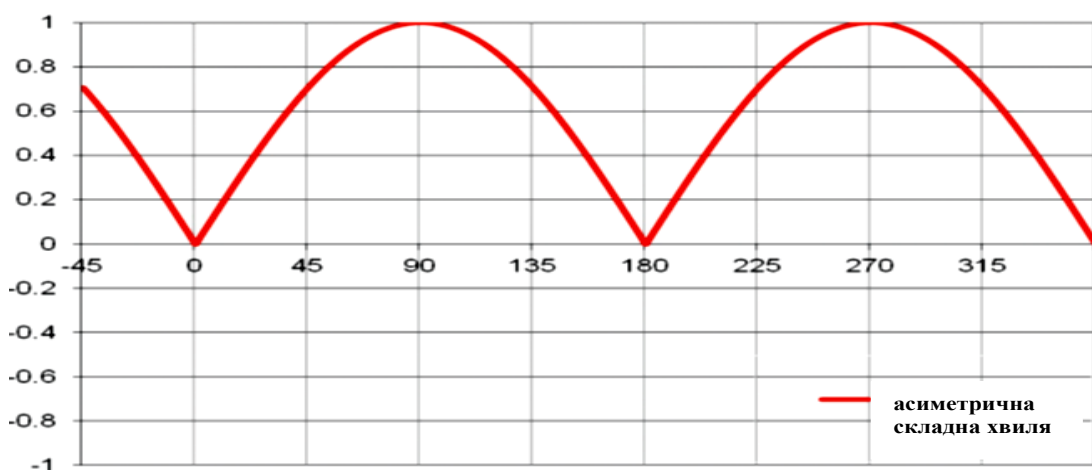


Рисунок 1.7 Утворення асиметричної складної хвилі

Класичним прикладом асиметричної форми сигналу є вихід напівхвильового випрямляча, як показано на рис.1.7.[7]

1.3. Синтез несинусоїдальної форми сигналу з використанням аналізу Фур'є

Нелінійна трапецієподібна форма кривої вхідного струму змінного струму мостового випрямляча, як показано на рис. 1.1(b), повторюється з періодом часу T і частотою $f (= \omega/2\pi) = 1/T$, тобто основною частотою, і зазвичай позначається індексом 1[3]. На додаток до домінуючої компоненти на основній частоті, форма кривої на рис. 1.1(b) містить компоненти на небажаних частотах, які є гармоніки (кратними) основної частоти. Ці компоненти обчислюються за допомогою аналізу Фур'є[8]. Загалом, несинусоїдальна форма сигналу $f(t)$, що повторюється з кутовою частотою ω , може бути виражена як:

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\} \quad (1.2)$$

де $F_0 = \frac{a_0}{2}$ середнє значення

У рівнянні (2.2),

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, 2, \dots, \infty \quad (1.3)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, 2, \dots, \infty \quad (1.4)$$

З рівнянь (2.3) і (2.4) середнє значення для $\omega = 2\pi f$ таке:

$$F_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.5)$$

Отже, середньоквадратичне значення всіх гармонійних складових, включно з основною (тобто $h = 1$), разом становить:

$$F_h = \frac{\sqrt{a_h^2 + b_h^2}}{\sqrt{2}} \quad (1.6)$$

Загальне середньоквадратичне (RMS) значення функції $f(t)$ може бути виражене як середньоквадратичні значення компонент її ряду Фур'є:

$$F = \sqrt{F_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2} \quad (1.7)$$

Для симетричних АС сигналів, таких як показано на рис. 1.1(b), середнє значення дорівнює нулю ($F_0 = 0$), а значення a_h та b_h можуть бути спрощені наступним чином:

$$a_h = 0 \text{ та } b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, 2, \dots, \infty \quad (1.8)$$

Використовуючи вищезазначений аналіз, у стаціонарному режимі, симетричний вхідний змінний струм, показаний на рис. 1.1(b), та симетричну змінну напругу мережі в точці спільного підключення (ТСП), показану на рис. 2.2(b), можна представити у вигляді суми їх гармонійних (Фур'є) складових наступним чином:

$$i_{ac}(t) = i_{ac1}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{ach}(t) \quad (1.9)$$

$$v_{psc}(t) = v_{psc1}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} v_{psch}(t) \quad (1.10)$$

де i_{ac1} та v_{psc1} є основними компонентами (лінійна частота f_1); а i_{ach} та v_{psch} є компонентами на h -й гармонічній частоті, $f_h = h \cdot f_1$, вхідного змінного струму мостового випрямляча та напруги змінного струму в точці загального приєднання (РСС), відповідно.

Висновок до першого розділу

У розділі узагальнено теоретичні основи виникнення та впливу гармонічних спотворень в електроприводах:

- Лінійне навантаження споживає струм, пропорційний прикладеній напрузі; нелінійне — має змінний імпеданс, тому навіть при синусоїдальній напрузі споживає несинусоїдальний струм, що породжує гармоніки.
- Статичні перетворювачі потужності (випрямлячі, інвертори, імпульсні блоки живлення, приводи з частотним регулюванням) є основними джерелами гармоніки у сучасних енергосистемах.
- Несинусоїдальні струми, проходячи через кінцевий імпеданс мережі,

викликають нелінійні падіння напруги та спотворення напруги в точці сумісного приєднання (ТСП/РСС); амплітуда спотворень залежить від величини імпедансу джерела.

- Аналіз Фур'є дозволяє розкласти напруги й струми на основну й гармонічні складові; симетричні форми містять тільки непарні гармоніки, асиметричні — парні та постійну складову.

- Гармонічний спектр (порядки гармоніки) визначає ступінь відхилення від синусоїди й має прямі наслідки для ефективності та надійності обладнання (перегрів трансформаторів, резонанси, некоректна робота захисту та електроніки).

- Нормативи (наприклад, IEEE 519) визначають допустимі рівні гармоніки і слугують орієнтиром для проектування та експлуатації.

Рекомендація: для зменшення впливу гармоніки застосовувати заходи контролю — коректний вибір обладнання, проектування системи з урахуванням імпедансі, фільтри (пасивні/активні), та дотримуватися вимог стандартів.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖУ

Як показано на рис. 1.2(a) та 1.2(b), коли нелінійне навантаження споживає спотворений (несинусоїдальний) струм від джерела живлення, цей струм взаємодіє з імпедансом між навантаженням і джерелом живлення. Результуючі гармонічні струми, що протікають через імпеданс системи, призводять до падінь напруги на кожній гармонічній частоті, як описано законом Ома в рівнянні 2.1. Загальне спотворення напруги є векторною сумою цих окремих падінь напруги, на яку впливають імпеданс системи, доступні рівні струму короткого замикання та значення гармонічних струмів на кожній частоті[9].

На рис 2.1 детально показано, як окремі гармонічні струми впливають на імпеданс в електричній мережі та відповідні падіння напруги. Важливо зазначити, що сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги (%THDV), розрахований як векторна сума всіх окремих гармонік, як правило, зростає при віддаленні від джерела живлення до нелінійного навантаження.

Зокрема, %THDV на клемах нелінійного навантаження буде більшим, ніж на клемах трансформатора, який, у свою чергу, буде вищим, ніж %THDV, виміряний поблизу джерела живлення. Таке зростання спотворень в основному зумовлене поширенням гармонічних струмів по системі.

Більше того, вплив гармонічних струмів на форму напруги, спричинений нелінійними падіннями напруги на імпеданс системи, зростає з навантаженням і є найбільш значним при повному навантаженні нелінійного навантаження або обладнання. Тому, для оцінки найгірших наслідків гармонічних спотворень, гармонійні вимірювання зазвичай проводяться, коли нелінійне навантаження або обладнання працює на повному навантаженні[10].

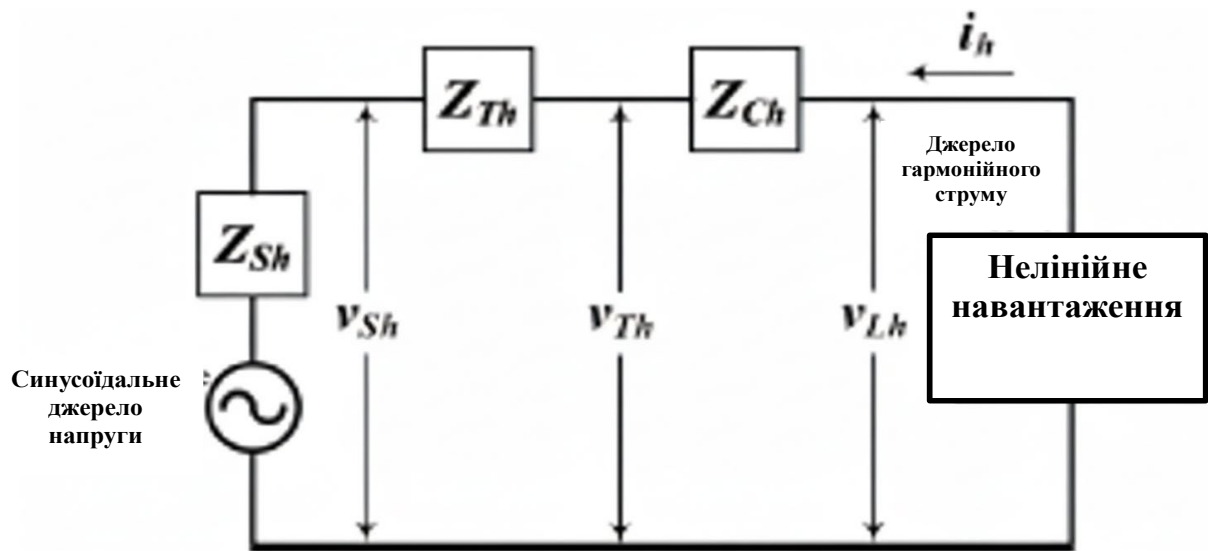


Рисунок 2.1 Падіння гармонійної напруги на окремих імпедансах системи

$$V_h = I_h \times Z_h \text{ (Закон Ома)} \quad (2.1)$$

При завантаженні:

$$V_{Lh} = I_h \times (Z_{Ch} + Z_{Th} + Z_{Sh}) \quad (2.2)$$

На трансформаторі:

$$V_{Th} = I_h \times (Z_{Th} + Z_{Sh}) \quad (2.3)$$

У джерелі:

$$V_{Sh} = I_h \times Z_{Sh} \quad (2.4)$$

Де:

Z_h = Імпеданс на частоті гармоніки (для 5-ї гармоніки, $5 \times 50 = 250$ Гц).

V_h = Напруга гармоніки h-го порядку (наприклад, 5-ї).

I_h = Струм гармоніки h-го порядку (наприклад, 5-ї).

Z_S , Z_T та Z_C = Імпеданси джерела, трансформатора та кабелю відповідно (додатковий суфікс "h" вказує на імпеданс на певній гармонічній складовій або частоті).

V_S , V_T , та V_L , = Напруги на клеммах джерела, трансформатора та навантаження відповідно.

(додатковий суфікс "h" вказує на напруги на певній гармонічній складовій або частоті)

2.1 Генератори

Порівняно з електромережами, вплив гармонійної напруги і струмів значно більш виражений у генераторах, особливо в автономних генераторах, що використовуються як резервні джерела живлення, а також у генераторах, які використовуються на судах або в морських застосуваннях. Ця підвищена чутливість значною мірою зумовлена вихідним імпедансом цих генераторів, який зазвичай у три-чотири рази більший, ніж у силових трансформаторів електромережі[11].

Основним наслідком гармоніки напруги та струму є збільшення нагріву машини, викликане підвищеними втратами в сталі та міді, обидва з яких залежать від частоти та зростають з наявністю гармоніки. Щоб пом'якшити негативний вплив гармонійного нагрівання, генератори, що живлять нелінійні навантаження, повинні працювати зі зниженою потужністю. Крім того, наявність гармонійних складових зворотної та нульової послідовності при нелінійному навантаженні може призвести до локального нагрівання, пульсацій крутного моменту та торсіонних коливань, що ще більше ускладнює операційну стабільність.

2.2 Трансформатори

Гармонійні струми на певних гармонійних частотах призводять до збільшення втрат у осерді трансформаторів, в основному, через підвищені втрати в сталі (тобто вихрові струми та гістерезис). Крім того, збільшені втрати в міді та втрати від розсіяного потоку сприяють подальшому нагріванню та створюють напругу на ізоляції обмоток, особливо за наявності високих значень dv/dt (швидкості наростання напруги). Циклічні зміни температури та потенційний резонанс між індуктивністю обмотки трансформатора та ємністю живлення можуть погіршити ці втрати. Вібрації невеликого, шаруватого осердя посилюються з гармонійними частотами, часто проявляючись як додатковий чутний шум. Крім того, збільшений середньоквадратичний струм, що виникає внаслідок гармоніки, підвищує втрати I^2R (втрати в міді). Розподільчі трансформатори, які використовуються

в чотири провідних системах (три фази плюс нейтраль), зазвичай використовують конфігурацію дельта-зірка. У цій конфігурації первинна обмотка, з'єднана в дельту, запобігає поширенню триплетних гармонійних струмів (3-ї, 9-ї, 15-ї тощо) вниз по потоку; натомість ці струми циркулюють у первинній дельта-обмотці, що призводить до локального перегріву[12,13].

За лінійних збалансованих умов навантаження трифазні струми ефективно взаємно компенсуються в нейтральному провіднику. Однак, з нелінійними навантаженнями з незбалансованими умовами навантаження, триплетні гармоніки у фазних струмах не компенсуються, що призводить до кумулятивного додавання в нейтральному провіднику на переважній частоті 180 Гц (3-тя гармоніка). Це накопичення може спричинити перегрів трансформатора і, в деяких випадках, пошкодження нейтральних провідників.

Щоб пом'якшити ці проблеми, рекомендується використовувати агрегати з відповідним "К-фактором" для нелінійних навантажень.

2.3 Асинхронні двигуни

Гармонійні спотворення збільшують втрати в асинхронних електродвигунах змінного струму подібно до трансформаторів, що призводить до інтенсивнішого нагрівання через додаткові втрати в міді та залізі (включаючи втрати на вихрові струми та гістерезис) в обмотках статора, ланцюгах ротора та пластинах ротора. Ці втрати посилюються скін-ефектом, особливо на частотах вище 300 Гц. Крім того, магнітні поля розсіювання, що генеруються гармонійними струмами в торцевих обмотках статора та ротора, призводять до додаткових втрат на вихрові струми внаслідок паразитних частот. Асинхронні двигуни з похилими пазами ротора можуть зазнавати значних втрат у залізі через високочастотні струми та швидкі зміни потоку, головним чином внаслідок гістерезису як у статорі, так і в роторі. Надмірний нагрів може погіршити змащення підшипників, що потенційно призводить до їх руйнування. Крім того, гармонійні струми можуть генерувати струми в підшипниках; однак, цю проблему можна пом'якшити за допомогою

ізолюваних підшипників, що є звичайною практикою в електродвигунах змінного струму, що живляться від перетворювачів частоти[14].

Перегрів значно обмежує термін служби асинхронних двигунів. На кожні 10°C підвищення температури понад номінальний рівень термін служби ізоляції двигуна може скоротитися на цілих 50%. Ротори з короткозамкненою обмоткою, як правило, витримують вищі рівні температури порівняно з роторами з фазною обмоткою. Крім того, обмотки двигуна, особливо ті, що мають ізоляцію класу В або нижче, вразливі до пошкоджень від високого dv/dt (швидкості наростання напруги), пов'язаного з вирізкою лінії та коливаннями через гармонійні струми.

Гармонійні послідовності також мають згубний вплив на асинхронні двигуни. Позитивні послідовності (наприклад, 7-а, 13-а, 19-а) сприяють створенню крутного моменту, тоді як негативні послідовності (наприклад, 5-а, 11-а, 17-а) протидіють напрямку обертання, що призводить до пульсацій крутного моменту. Нульові послідовності (кратно триpletним гармонікам) є стаціонарними і не обертаються, внаслідок чого будь-яка пов'язана з ними гармонійна енергія розсіюється у вигляді тепла. Пульсації крутного моменту, що генеруються цими гармонійними послідовностями, можуть бути значними, що потенційно призводить до проблем з торсіонними коливаннями валу.

2.4 Кабелі

Втрати в кабелях, що розсіюються у вигляді тепла, значно збільшуються при протіканні гармонійних струмів через підвищені втрати I^2R . Опір (R) кабелю залежить не тільки від його значення для постійного струму, але й від скін-ефекту та ефекту близькості. Зокрема, опір провідника змінюється залежно від частоти струму, що ним протікає.

Скін-ефект[15] призводить до того, що струм переважно протікає поблизу поверхні провідника, де імпеданс найнижчий. Аналогічно, ефект близькості виникає внаслідок взаємної індуктивності між тісно розташованими паралельними провідниками, впливаючи на те, як розподіляється струм. Обидва ефекти залежать від таких факторів, як розмір

провідника, частота, питомий опір і магнітна проникність матеріалу провідника[16].

При основних частотах скін-ефект і ефект близькості зазвичай незначні, особливо в провідниках меншого розміру. Однак, зі збільшенням частоти опір значно змінюється, що призводить до збільшення загальних втрат I^2R .

Протікання струмів нульової послідовності або синфазних струмів, що виникають внаслідок гармоніки у незбалансованому стані, може ще більше посилити вищезазначені ефекти та збільшити нагрівання кабелю.

2.5 Автоматичні вимикачі та запобіжники

Більшість низьковольтних теплових-магнітних автоматичних вимикачів використовують біметалічні механізми розчіплювання, які реагують на тепловий ефект діючого (середньоквадратичного) значення струму. За наявності нелінійних навантажень діюче значення струму буде вищим, ніж для лінійних навантажень тієї ж потужності. Відповідно, якщо рівень струму розчіплювання не відрегульовано належним чином, вимикач може спрацювати передчасно під час роботи з нелінійним струмом.

Автоматичні вимикачі розроблені для переривання струму в точках переходу через нуль. Однак, за наявності сильно спотворених умов живлення – таких як провали або дзвін у лінії – помилкові "переходи через нуль" можуть призвести до передчасного спрацювання, запобігаючи належному функціонуванню вимикача під час перевантаження або аварійного режиму. Важливо зазначити, що у випадку короткого замикання величина гармонійного струму незначна порівняно зі струмом короткого замикання[17].

Аналогічно, вплив гармоніки на автоматичні вимикачі з електронними блоками розчіплювання може бути значним, враховуючи їхню залежність від цифрової обробки та точних вимірювань. Оскільки пік гармонійного струму, як правило, вищий за нормальний, цей тип автоматичного вимикача може спрацювати передчасно при низькому струмі. Якщо пік нижчий за нормальний, вимикач може не спрацювати, коли це потрібно. Крім того, гармоніки можуть викликати шум і коливання в формі струму. Електронні

блоки розчіплювання можуть інтерпретувати ці спотворення як умови перевантаження по струму, викликаючи непотрібні спрацювання навіть за нормальних умов експлуатації. Якщо електронні блоки розчіплювання взаємодіють з іншими пристроями, які також реагують на гармонійні частоти, існує потенціал для виникнення резонансних умов, що може призвести до несподіваної поведінки та збільшення навантаження на обладнання. Отже, гармоніки можуть значно впливати на продуктивність і надійність автоматичних вимикачів з електронними блоками розчіплювання, що вимагає ретельного врахування в системах з нелінійними навантаженнями. Регулярний моніторинг і відповідні коригування можуть допомогти пом'якшити ці наслідки[18].

Запобіжники працюють на основі теплового ефекту діючого (середньоквадратичного) значення струму, відповідно до їхніх характеристик I^2t . Вищий діючий струм призводить до швидшого спрацювання запобіжника. Оскільки діючий струм для нелінійних навантажень більший, ніж для лінійних навантажень з аналогічним номіналом, може знадобитися зниження номіналу для запобігання передчасному перегоранню запобіжника. Крім того, на гармонійних частотах запобіжники зазнають впливу скін-ефекту та ефекту близькості, що призводить до нерівномірного розподілу струму по запобіжним елементам і створює додаткове теплове навантаження на пристрій.

2.6 Освітлення

Одним із помітних ефектів гармоніки на освітлення є явище, відоме як "мерехтіння", що означає періодичні коливання інтенсивності світла. Системи освітлення особливо чутливі до змін діючої напруги (RMS); навіть незначні відхилення, що становлять лише 0,25%, можуть бути помітними для людського ока, особливо у випадку певних типів ламп. Накладені між гармонійні напруги в мережі живлення можуть значно сприяти мерехтінню світла в лампах розжарювання, люмінесцентних та світлодіодних лампах (LED)[19].

2.7 Інші негативні наслідки гармоніки

Корекція коефіцієнта потужності: Конденсатори для корекції коефіцієнта потужності зазвичай встановлюються на промислових підприємствах та в комерційних будівлях. Крім того, люмінесцентне або LED освітлення в цих приміщеннях часто містить внутрішні конденсатори для покращення коефіцієнта потужності кожного світильника. Однак, гармонійні струми можуть взаємодіяти з цими ємностями та індуктивностями системи, іноді збуджуючи паралельний резонанс. Цей резонанс може призвести до перегріву, збоїв та потенційних пошкоджень обладнання та установки.

Електромагнітні перешкоди (ЕМІ): Силові кабелі, що проводять гармонійні навантаження, можуть спричиняти електромагнітні перешкоди (ЕМІ) в сусідні сигнальні або контрольні кабелі через провідні та випромінювані викиди. Цей "ЕМІ шум" може негативно впливати на такі пристрої, як телефони, телевізори, радіоприймачі, комп'ютери, системи управління та інше обладнання. Для мінімізації ЕМІ важливо дотримуватися належних процедур заземлення та підтримувати розмежування всередині корпусів та зовнішніх кабельних систем[20].

Точність вимірювання: Обладнання, яке покладається на звичайні методи вимірювання або тепловий ефект струму, може несправне працювати за наявності нелінійних навантажень. Наслідки неточних вимірювань можуть бути значними; перевантажені кабелі можуть залишитися непоміченими, збільшуючи ризик пожежі, тоді як шини та кабелі можуть передчасно старіти. Крім того, як згадувалося вище, запобіжники та автоматичні вимикачі можуть не забезпечувати очікуваний рівень захисту. Тому важливо використовувати прилади, що базуються на техніках визначення дійсного середньоквадратичного значення, під час вимірювання енергосистем, що живлять нелінійні навантаження.

Індукційні напруги: В установках, де силові провідники, що проводять нелінійні навантаження, проходять паралельно телефонним сигнальним кабелям, ймовірно, індукують напруги в телефонних кабелях. Ця індукована

напруга може виникати в діапазоні частот від 540 Гц до 1200 Гц (від 9-ї до 20-ї гармоніки при основній частоті 60 Гц), що може створювати перешкоди[21].

Високочастотні перешкоди: Існує також ризик як провідних, так і випромінюваних перешкод на частотах, що перевищують нормальні гармонійні рівні, через приводи зі змінною швидкістю та інші нелінійні навантаження, особливо на високих несучих частотах. Для зменшення ризиків перешкод може знадобитися встановлення ЕМІ фільтрів на входах приводів та іншого ураженого обладнання.

Звичайні лічильники: Звичайні лічильники зазвичай призначені для зчитування синусоїдальних величин. Коли до цих лічильників подаються нелінійні напруги та струми, вони вносять похибки в схеми вимірювання, що призводить до неточних показань[22].

Висновок до другого розділу

Нелінійні навантаження створюють гармонійні струми, які через імпеданс системи викликають гармонійні падіння напруги — векторна сума цих падінь формує загальне спотворення напруги (THDV), що зазвичай зростає в напрямку від джерела до навантаження. Наслідки:

- Джерела (особливо автономні генератори) найбільш чутливі — вищий вихідний імпеданс призводить до значного підвищення нагріву та оперативних проблем; часто потрібне зниження потужності.
- Трансформатори: збільшені втрати в сталі й міді, вібрації, локальний перегрів через циркуляцію триплетних гармоніки; рекомендовані К-факторні трансформатори.
- Асинхронні двигуни: підвищені втрати, перегрів, скорочення ресурсу ізоляції, пульсації крутного моменту і торсіонні коливання; ізольовані підшипники та можливе зниження навантаження.
- Кабелі: зростання втрат I^2R , вплив скін-ефекту і ефекту близькості, підвищене нагрівання нейтралей при небалансі.
- Автоматичні вимикачі та запобіжники: некоректні спрацьовування

через підвищене діюче (RMS) та пікове значення струму; електронні розділювачі чутливі до шуму.

- Освітлення: мерехтіння навіть при малих відхиленнях RMS-напрями.
- Інші проблеми: резонанси з батарея ми конденсаторів,

ЕМІ/індуковані перешкоди, помилкові покази звичайних лічильників і приладів.

Рекомендації для пом'якшення:

- Проводити гармонічні вимірювання за повного навантаження нелінійних пристроїв.

– Використовувати фільтри (пасивні/активні), К-факторні трансформатори, ЕМІ-фільтри та ізольовані підшипники.

– За потреби — знижувати навантаження/перепроєктовувати мережу, уникати резонансів (правильний вибір та розміщення конденсаторів), застосовувати прилади з true-RMS вимірюванням і регулярний моніторинг.

- Планувати захист і налаштування автоматичних вимикачів з урахуванням гармоніки.

Гармоніки підвищують втрати, нагрів і ризики некоректної роботи обладнання — їхній вплив слід оцінювати при реальному навантаженні й вирішувати комбінованими технічними заходами.

РОЗДІЛ 3

КОНТРОЛЬ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

3.1 Граничні значення емісії гармоніки згідно з ІЕС

ІЕС 61800-3

ІЕС 61800-3 — це стандарт продукції для приводів змінної швидкості, який визначає вимоги щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) та конкретні методи випробувань[23].

Для приводів змінної швидкості або перетворювачів, що використовуються в мережі громадського низької напруги, ІЕС 61800-3 посиляється на відповідність стандартам ІЕС 61000-3-2 (≤ 16 А) та ІЕС 61000-3-12 (>16 А та ≤ 75 А). Якщо в установках містяться кілька перетворювачів або приводів змінної швидкості з номінальним входним струмом до 75 А, вимоги стандартів ІЕС 61000-3-2 та ІЕС 61000-3-12 застосовуються до всієї установки.

Якщо в установках містяться приводи змінної швидкості або перетворювачі з номінальним входним струмом > 75 А, ІЕС 61800-3 рекомендує оцінку загальної системи відповідно ІЕС/TR 61000-3-14 та додатка В.4 ІЕС 61800-3.

Для приводів змінної швидкості або перетворювачів, що використовуються в промисловому середовищі (негромадські мережі), ІЕС 61800-3 не визначає жодних граничних значень для гармоніки струму. ІЕС 61800-3 рекомендує оцінку загальної системи відповідно до ІЕС/TR 61000-3-14 та додатка В.4 ІЕС 61800-3.

ІЕС 61000-2-2

ІЕС 61000-2-2 визначає рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних завад та сигналізації в публічних низьковольтних системах електропостачання. Таблиця 1 у цьому стандарті визначає рівні сумісності для окремих гармонійних складових напруги в точці спільного приєднання (РСС) до гармонійного порядку 40 включно та відповідний рівень сумісності для коефіцієнта загальних гармонійних спотворень ($\%THDV$) = 8%. Таблиці 2 та

З стандарту визначають рівні сумісності для низькочастотних спотворень напруги в діапазоні частот від 40-го порядку до 9 кГц та від 9 кГц до 150 кГц відповідно. ІЕС 61000-2-2 встановлює критерії проектування для виробників обладнання, визначаючи мінімальні вимоги до стійкості, яким повинні відповідати їхні вироби[24].

ІЕС 61000-2-4

ІЕС 61000-2-4 подібний до ІЕС 61000-2-2, проте визначає рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних завад для промислових і неpubлічних мереж. Він охоплює низьковольтні, а також середньовольтні мережі живлення (до 35 кВ), хоча виключає мережі для суден, літаків, морських платформ і залізниць. Розглядається електромагнітна сумісність (ЕМС) у внутрішньозаводській точці приєднання (ІРС). ІРС - це внутрішньозаводська точка приєднання до мережі живлення, до якої інші навантаження підключені або можуть бути підключені[25].

Важливо зазначити, що рівні сумісності, визначені в серії стандартів ІЕС 61000-2-X, не є граничними значеннями, а скоріше, визначеними еталонними рівнями для узгодження граничних значень завад у визначеному середовищі. Рівні сумісності стосуються не окремих пристроїв, а точки приєднання систем[20].

3.2 Оцінка гармонійних складових системи

Для запобігання або вирішення потенційних проблем з гармоніками в межах промислового об'єкта, необхідно проводити ретельну оцінку гармоніки системи в наступних ситуаціях[26]:

- Розширення підприємства: коли значні нелінійні навантаження вводяться внаслідок розширення об'єкта.
- Додавання обладнання для корекції коефіцієнта потужності: коли батареї конденсаторів або лінійні гармонійні фільтри додаються на ввіді живлення або поблизу нього.
- Включення резервних джерел живлення: коли генератор

встановлюється як альтернативне джерело живлення.

– Накладення суворіших обмежень з боку енергопостачальної компанії: коли енергопостачальна компанія встановлює більш жорсткі обмеження на генерацію гармоніки для підприємства[27].

Як правило, постачальник або виробник обладнання з нелінійним навантаженням, наприклад, приводів змінної частоти, проводить оцінку потенційного впливу на розподільчу систему в рамках угоди про купівлю-продаж з власником об'єкта або замовником.

3.3 Методи для зменшення впливу гармонік на електромережу

Велике трифазне електричне нелінійне обладнання часто потребує стратегій пом'якшення для зменшення гармонійних струмів та пов'язаних з ними спотворень напруги до прийнятних рівнів[28,29]. Залежно від бажаного підходу, пом'якшення гармонік може бути інтегровано в нелінійне обладнання (наприклад, реактори змінного струму або лінійні гармонійні фільтри для АС PWM приводів) або надаватися як окремі рішення (наприклад, активні або пасивні фільтри, підключені до розподільчого щита). Існують різні методи пом'якшення гармонік, починаючи від конструкцій частото-регульованих приводів з низьким рівнем гармонік до додавання допоміжного обладнання. Ось деякі з найбільш поширених методів, які використовуються сьогодні[30]:

Трансформатори типу "трикутник-трикутник" та "трикутник-зірка"

Ця конфігурація використовує два окремі трансформатори живлення від енергомережі зі збалансованим нелінійним навантаженням. Зміщуючи фазові співвідношення між різними шестипульсними перетворювачами, цей метод використовує техніки компенсації для ефективного зменшення гармонік.[31]

Ізолюючі трансформатори

Ізолюючі трансформатори часто є ефективним рішенням для пом'якшення гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями. Вони пропонують перевагу "узгодження напруги" шляхом підвищення або зниження напруги системи, а також забезпечують нейтральну точку

заземлення для усунення хибних замикань на землю. Цей підхід особливо корисний для покращення загальної продуктивності системи та надійності приводів змінного або постійного струму, які використовують кремнієві керовані випрямлячі (SCR) або тиристори у своїх вхідних мостових випрямлячах[32].

Реактори змінного струму та дроселі постійного струму

Використання реактора є простим і економічно ефективним методом зменшення гармонік, що виробляються нелінійними навантаженнями, і часто є більш ефективним рішенням, ніж використання ізолюючого трансформатора. Реактори або індуктори зазвичай застосовуються до окремих навантажень, таких як приводи з регульованою швидкістю, і доступні в стандартних діапазонах імпедансу, таких як 2%, 3%, 5% і 7,5%.

Коли струм через реактор змінюється, на його клеммах індукується напруга в напрямку, протилежному прикладеній напрузі, протидіючі швидкості зміни струму. Ця індукована напруга на клеммах реактора виражається наступним рівнянням.

$$e = L \frac{di}{dt}$$

де:

e = Наведена напруга на клеммах реактора

L = Індуктивність реактора в Генрі

di/dt = Швидкість зміни струму через реактор в Амперах на секунду

Ця характеристика реактора є цінною для обмеження гармонійних струмів, що генеруються електричними приводами з регульованою швидкістю та іншими нелінійними навантаженнями. Крім того, АС-лінійні реактори допомагають зменшити загальний коефіцієнт гармонійних спотворень напруги (THDV) на їхній лінійній стороні, порівняно з тим, що спостерігається на клеммах приводів або інших нелінійних навантажень[33].

У електричних приводах з регульованою швидкістю реактори часто використовуються в поєднанні з іншими методами пом'якшення гармонік. Для

АС-приводів реактори можуть бути розміщені на АС-лінійній стороні (відомі як АС-лінійні реактори) або в ланці постійного струму або ланцюзі шини постійного струму (які називаються DC-дроселями або DC-реакторами шини) або як на АС-лінійній стороні, так і в шині постійного струму, залежно від конструкції та вимог до продуктивності приводів.

АС-лінійні реактори використовуються частіше, ніж DC-дроселі. Окрім зменшення гармонійних струмів, вони забезпечують захист від перенапруги для вхідного випрямляча приводу. Однак, одним з недоліків є те, що реактори викликають падіння напруги на клемах приводу, приблизно пропорційне відсотку реактивного опору.

Для великих приводів можуть використовуватися як АС-лінійні реактори, так і DC-дроселі, особливо коли потужність короткого замикання виділеного джерела живлення відносно висока (тобто, коли номінальна потужність трансформатора живлення у кВА велика і зазвичай > 10 разів) порівняно з номінальною потужністю приводу у кВА або якщо джерело живлення схильне до збурень. Типові значення для окремої частоти та загального коефіцієнта гармонійних спотворень струму для 6-пульсного фронтенду, з інтегральним лінійним реактором і без нього, представлені в Таблиці 3.1.

Пасивні гармонійні фільтри (або лінійні гармонійні фільтри)

Пасивні гармонійні фільтри, також відомі як лінійні гармонійні фільтри (ЛГФ) або фільтри-пастки гармонік, призначені для усунення або контролю домінуючих гармонік нижчого порядку, зокрема 5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік. Ці фільтри можуть використовуватися як окремі компоненти, інтегровані у великі нелінійні навантаження (такі як 6-пульсні приводи), або розгортатися для кількох малих однофазних нелінійних навантажень шляхом підключення їх до розподільного щита.

Таблиця 3.1 — Типові значення гармонічного струму (% від основного струму) для різних типів вхідних конфігурацій

Тип / конфігурація	5	7	11	13	17	19	23
Граничні значення IEEE 519-2022	4,0%	4,0%	2,0%	2,0%	1,5%	1,5%	0,6%
6-імпульсний без реактора в лінії (жорстке джерело)	80,0%	58,0%	18,0%	10,0%	7,0%	6,0%	5,0%
6-імпульсний з реактором по лінії 2—3%	40,0%	15,0%	5,0%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%
6-імпульсний з реактором по лінії 5%	32,0%	9,0%	4,0%	3,0%	3,0%	2,0%	1,5%
6-імпульсний з гармонічним фільтром у лінії (LHF)	2,5%	2,5%	2,0%	2,0%	1,5%	1,0%	0,5%
12-імпульсний	3,7%	1,2%	6,9%	3,2%	0,3%	0,2%	1,4%
18-імпульсний	0,6%	0,8%	0,5%	0,4%	0,3%	0,2%	0,3%
AFE (двоквадрантний режим)	0,9%	0,9%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%
AFE (чотириквадрантний режим)	0,5%	0,5%	0,4%	0,3%	0,2%	0,3%	0,4%

ЛГФ складається з пасивного L-C контуру, часто доповненого резистором для демпфування, налаштованого на конкретні частоти гармонік, які потребують згладжування (наприклад, 5-а, 7-а, 11-а, 13-а тощо). Робота цих фільтрів ґрунтується на "явищі резонансу", яке виникає через варіації частот в індукторах і конденсаторах. Резонансну частоту для послідовного

резонансного контуру (і теоретично для паралельного резонансного контуру) можна визначити за формулою:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.2)$$

де:

f_r = Резонансна частота (Гц).

L = Індуктивність фільтра (Генрі).

C = Ємність фільтра (Фарад).

Пасивні фільтри зазвичай підключаються паралельно до нелінійних навантажень, як показано на рис. 3.1. Вони "налаштовані" таким чином, щоб мати надзвичайно низький імпеданс на частотах гармонік, які вони мають на меті пом'якшити. Однак їх ефективність зменшується для гармонік вище 13-го порядку, що робить їх менш придатними для усунення гармонік вищих порядків.

Важливо зазначити, що пасивні фільтри чутливі до змін імпедансів джерела та навантаження. Вони можуть притягувати гармоніки від інших джерел, особливо нижче за течією від точки загального приєднання (PCC), що необхідно враховувати при їх проектуванні. Відповідно, часто проводяться дослідження гармонік та енергосистеми для оцінки їх ефективності та для оцінки потенціалу виникнення резонансу в енергосистемі, пов'язаного з їх використанням. Типові значення для окремої частоти та сумарного коефіцієнту гармонійних спотворень (THD) струмової кривої для 6-пульсного випрямляча з інтегральним LHF наведено в таблиці 3.1.

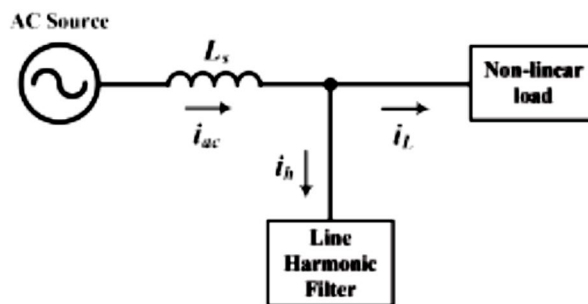


Рисунок 3.1 Типове підключення пасивного гармонічного фільтра

12-пульсний перетворювач, вхідна частина

У 12-пульсній конфігурації перетворювача, у вхідному мостовому випрямлячі використовується дванадцять діодів замість звичайних шести. Ця конструкція значно зменшує 5-ту та 7-му гармоніки, зміщуючи їх вплив на гармоніки вищого порядку, переважно 11-ту та 13-ту. Хоча це мінімізує величину цих гармонік нижчого порядку, це не усуває їх повністю.

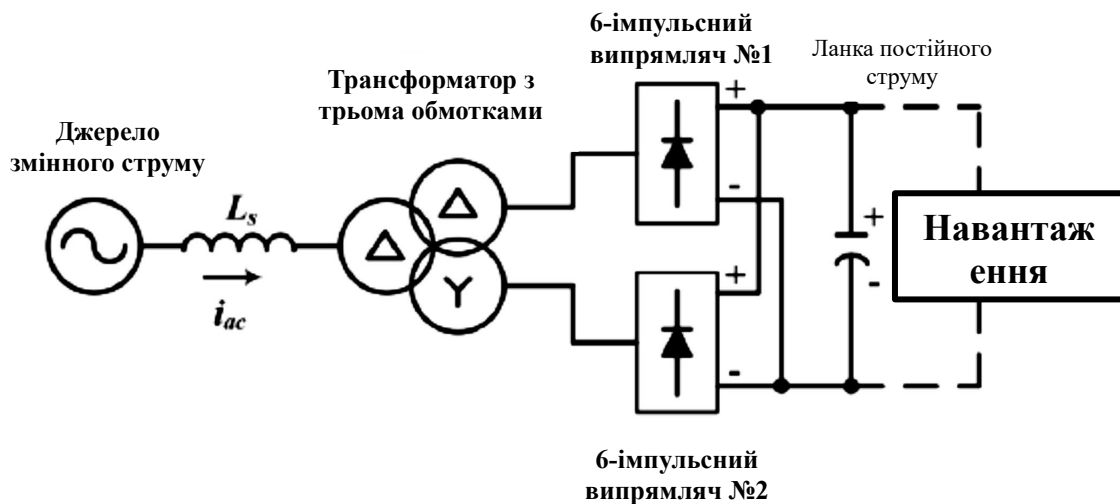


Рисунок 3.2 Типова вхідна частина 12-пульсного перетворювача

Проте, така конфігурація має деякі недоліки, зокрема вищі витрати та необхідність спеціалізованого будівництва. Для досягнення необхідного зсуву фаз на 30° для належної роботи 12-пульсної схеми, зазвичай потрібен або трансформатор Delta-Delta та Delta-Wye, "Zig-Zag" трансформатор, або фазозсувний автотрансформатор. Крім того, наявність трансформатора може вплинути на загальну ефективність системи приводу через пов'язані з цим втрати та падіння напруги. На рис. 3.2 зображено типову схему вхідної частини 12-пульсного перетворювача. У цій конфігурації виходи постійного струму обох 6-пульсних мостових випрямлячів з'єднані паралельно для збільшення пропускної здатності по струму або послідовно для підвищення напруги шини постійного струму [34,35]. Типові значення гармонійних спотворень для струму, споживаного 12-пульсним перетворювачем, представлені в таблиці 3.1.

Активні фільтри

Активні фільтри стають все більш поширеними в промислових застосуваннях як для пом'якшення гармонік, так і для компенсації реактивної потужності, слугуючи ефективними рішеннями для електронної корекції коефіцієнта потужності[36,37]. На відміну від пасивних L-C фільтрів, активні фільтри не створюють потенційний резонанс у мережі та залишаються нечутливими до змін імпедансу джерела. Найбільш поширена конфігурація активних фільтрів – це паралельне підключення, тобто вони встановлюються паралельно нелінійному навантаженню, як показано на рис. 3.3. Ці активні фільтри використовують IGBT-міст та архітектуру шини постійного струму, подібно до тієї, що використовується в АС PWM приводах, при цьому шина постійного струму виконує роль накопичувача енергії[33].

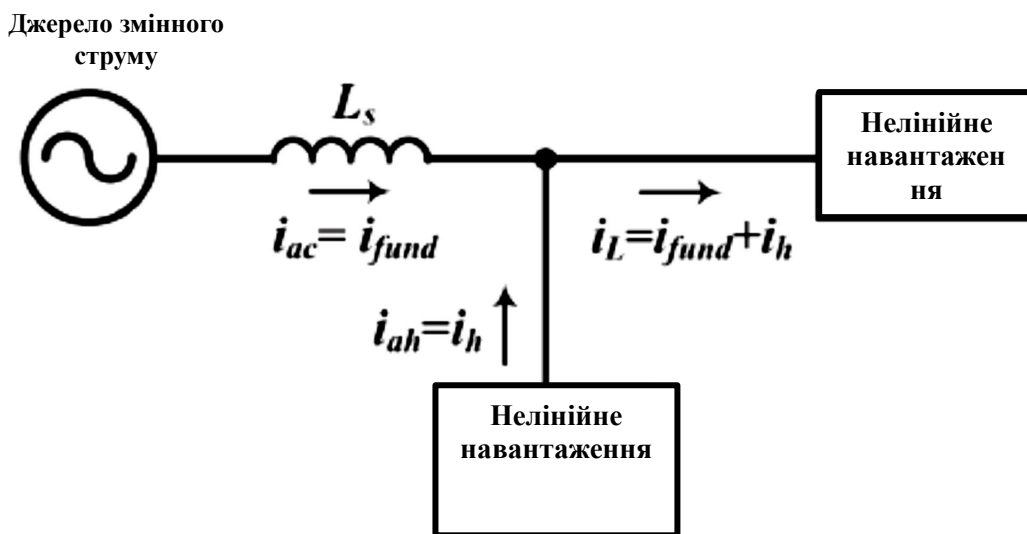


Рисунок 3.3 Типове з'єднання активного фільтра

Активний фільтр безперервно відстежує форму сигналу "струму спотворень", фільтруючи основний струм з нелінійного струму навантаження. Цей відфільтрований сигнал потім подається на контролер, який генерує необхідні схеми спрацювання IGBT для відтворення та підсилення струму спотворень. Отриманий "компенсаційний струм" вводиться в навантаження в проти фазі (зміщений на 180°), щоб ефективно протидіяти гармонійним струмам. Якщо активний фільтр правильно розрахований для компенсації

гармонік, він забезпечує нелінійне навантаження необхідним гармонійним струмом, тоді як джерело забезпечує лише основний струм[38].

Попри свої переваги, активні фільтри є складними та дорогими, ніж пасивні рішення. Ретельне введення в експлуатацію є вирішальним для досягнення оптимальної продуктивності, хоча тепер доступні моделі, що "само настраюються", щоб спростити цей процес. Загалом, активні фільтри демонструють чудову продуктивність у зменшенні гармонік та контролі коефіцієнта потужності. Їх впровадження слід оцінювати в кожному конкретному випадку, враховуючи конкретні критерії застосування.

Активний вхідний каскад

Активні вхідні каскади (AFE), також відомі як синусоїдальні вхідні випрямлячі, є передовими рішеннями, які пропонуються різними виробниками приводів змінного струму з регульованою частотою та системами безперебійного живлення (UPS) для мінімізації гармонійних спотворень вхідної мережі живлення. Ці системи розроблені для покращення якості електроенергії, що робить їх ідеальними для сучасних промислових застосувань[39].

AFE можуть бути розроблені у двох конфігураціях: двоквADRANTні та чотириквADRANTні активні випрямлячі. Обидві конструкції забезпечують високу динамічну реакцію та демонструють високу стійкість до провалів напруги[40]. Вони досягають коефіцієнта потужності, близького до одиниці (приблизно від 0,98 запізнення до одиниці), при цьому споживаючи незначну реактивну потужність. Типові гармонійні спектри обох типів конфігурацій AFE показані в таблиці 3.1.

Висновок до третього розділу

Оскільки використання нелінійних навантажень продовжує зростати, проблеми, пов'язані з гармоніками в системах електропостачання, стають дедалі виразнішими. Промислові споживачі повинні враховувати складнощі, пов'язані з проектуванням систем керування та моніторингу, щоб забезпечити відповідність обмеженням гармонійних спотворень, визначеним в IEEE 519 та

серії стандартів ІЕС 61000. Отже, промисловим підприємствам необхідно проводити комплексну оцінку системи, включаючи аналіз гармонійних спотворень, на етапах планування будівництва або розширення. Постачальники нелінійного обладнання (навантажень), таких як перетворювачі частоти (VFD), можуть пропонувати цінні послуги та рекомендувати обладнання для ефективного пом'якшення гармонік та забезпечення відповідності цим стандартам.

У системах електропостачання низької напруги (з напругою живлення $\leq 1,0$ кВ) загальний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) напруги в будь-якій точці загального приєднання (PCC) не повинен перевищувати 8,0%, а індивідуальний коефіцієнт гармонійних спотворень повинен залишатися нижчим за 5,0% від основної напруги. Вплив гармонійних спотворень струму на форму сигналу напруги є найбільш вираженим при повному навантаженні, тому вимірювання гармонік зазвичай проводяться за цих умов. Як правило, гармоніки вимірюються до 25-го порядку, але в критичних застосуваннях вимірювання можуть поширюватися до 50-го порядку, залежно від конкретних вимог.

Існує безліч методів пом'якшення гармонік, що відповідають як індивідуальним застосуванням (наприклад, для кожного приводу), так і стратегіям "глобального пом'якшення" для групи нелінійних пристроїв. У цьому документі викладено кілька популярних рішень, які можна адаптувати до конкретних застосувань та бажаних рівнів послаблення, щоб відповідати критеріям, встановленим IEEE 519 та серією стандартів ІЕС 61000. Обираючи відповідний підхід до пом'якшення гармонік, підприємства можуть покращити якість електроенергії та забезпечити ефективність роботи, дотримуючись нормативних вимог.

ЗАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Оскільки використання нелінійних навантажень продовжує зростати, проблеми, пов'язані з гармоніками в системах живлення, стають дедалі помітнішими. Промислові споживачі повинні враховувати складнощі, пов'язані з розробкою систем керування та моніторингу, щоб забезпечити відповідність обмеженням гармонічних спотворень, зазначеним у стандартах IEEE 519 та серії IEC 61000. Отже, промисловим підприємствам важливо проводити комплексну оцінку системи, включаючи аналіз гармонічних спотворень, на етапах планування будівництва або розширення. Постачальники нелінійного обладнання (навантажень), такого як приводи змінної частоти (VFD), можуть пропонувати цінні послуги та рекомендувати обладнання для ефективного зменшення гармоніки та забезпечення відповідності цим стандартам.

У системах живлення низької напруги (з напругою живлення $\leq 1,0$ кВ) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) напруги в будь-якій точці загального приєднання (PCC) не повинен перевищувати 8,0%, тоді як індивідуальні гармонічні спотворення повинні залишатися нижче 5,0% від основної напруги. Вплив гармонічних спотворень струму на форму сигналу напруги є найбільш помітним при повному навантаженні, тому вимірювання гармонік зазвичай проводяться за цих умов. Як правило, гармоніки вимірюються до 25-го порядку, але в критичних застосуваннях вимірювання можуть поширюватися до 50-го порядку, залежно від конкретних вимог.

Існує безліч методів зменшення гармоніки, які застосовуються як для окремих застосувань (наприклад, для кожного приводу), так і для стратегій "глобального зменшення" для групи нелінійних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Визначення та характеристики нелінійного навантаження
<https://ua.topwaverf.com/info/definition-and-characteristics-of-nonlinear-load-63961762.html>
2. ASYMMETRIC Waveforms <https://forums.steinberg.net/t/asymmetric-waveforms-what-is-your-go-to-fix/850186>
3. Static converters, dynamic performance.
https://library.e.abb.com/public/5fde0e77f28f90abc12577750033167b/42-47%202m056_ENG_72dpi.pdf
4. В. Самотий У. Дзелендзяк. Математична модель каскаду «однофазний двопівперіодний випрямляч – мотор постійного струму з паралельним збудженням 1. Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра комп’ютеризованих систем автоматики 2. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, katedra Automatyki i Technik Informacyjnych
5. Principle single-line diagram of the electrical power distribution system
https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-one-line-diagram-for-electric-power-generation-and-distribution-system_fig3_335972352
6. https://www.researchgate.net/figure/Harmonic-spectrum-of-pulsed-ac-current-i-as-when-m-a-08-f-0-50-Hz-f-s-12-kHz_fig5_346628726
7. Гулак С., Ткаченко В. Теорія адаптивної компенсації реактивної потужності електричного рухомого складу залізниць: монографія / С. Гулак, В. Ткаченко. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2022. – 174 с.
8. Аналіз Фур'є.
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7_%D0%A4%D1%83%D1%80%27%D1%94
9. Інформаційна технологія реалізації Фур'є-інтегрального методу ідентифікації для відновлення вхідних сигналів інформаційно-вимірювальних систем <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3266>
10. Енергія гармонійних коливань.
https://www.bog5.in.ua/lection/vibration_lect/lect3_vibr_ukr.html

11.Смирнов С.С., Коверников Л.И. Вплив комутацій елементів мережі на режим вищих гармонік // Промислова енергетика, 2000. № 8. С. 45 -48.

12.Проблеми вищих гармонік у електромережах
<https://energyall.com.ua/problemu-vusshuh-garmonik>

13.Гармоніки на трансформаторі/ <http://ua.scotech-electrical.com/info/the-harmonics-on-the-transformer-86013988.html>

14. Беліков О.М., Юрченко Е.Л Вплив гармонік на тепловий стан асинхронного двигуна при живленні його від перетворювача частоти
https://eprints.kname.edu.ua/46978/1/ilovepdf_com-83-85.pdf

15.Скін-ефект
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%96%D0%BD-%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82>

16.Вплив процесів нагріву на термін служби кабелю Галузь «Енергетика» Напрямок «Електроенергетика» Маріуполь 2021

17.The impact of harmonics on circuit breakers and fuses
https://www.google.com/search?q=The+impact+of+harmonics+on+circuit+breakers+and+fuses&oq=The+impact+of+harmonics+on+circuit+breakers+and+fuses&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIHCAEQABjvBTIHCAIQABjvBTIHCA MQABjvBTIHCAQQABjvBTIKCAUQABiABBiiBNIBCTM0MTVqMGoxNagCCLACAfEFyy8U5pL858g&sourceid=chrome&ie=UTF-8

18.Причини мерехтіння ламп та способи усунення проблеми.
<https://axiomplus.com.ua/ua/news/prichiny-mercaniya-lamp-i-sposoby-ustraneniya-problemy/?srsltid=AfmBOormPV329lXxZga3ZwfiEKnySezyv5rRAUxQ621lLrwW3MqV6uvH>

19.Загальні питання впливу вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств на роботу систем релейного захисту й автоматики. <https://eprints.kname.edu.ua/40587/1/114-115.pdf>

20.Важливість зменшення гармонік у сучасних електричних системах

<https://www.intonepower.com/uk/news/the-importance-of-harmonic-mitigation-in-modern-electrical-system/>

21. Адамова С. В. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів Таврійський державний агротехнологічний університет Науковий вісник ТДАТУ Вип. 8, том 2

22. IEC Standard for Adjustable speed electrical power drive systems—Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools, IEC 61800-3:2022.

23. IEC Standard for Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment—Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, IEC 61000-2-2:2022.

24. IEC Standard for Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-4: Environment - Compatibility levels in power distribution systems in industrial locations for low-frequency conducted disturbances, IEC 61000-2-4:2024.

25. Methods for Estimation of Voltage Harmonic Components
https://www.academia.edu/17407810/Methods_for_Estimation_of_Voltage_Harmonic_Components

26. Harmonics in power systems.
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8ab2a02e-ad94-41cb-a362-438f016aa704/drive-harmonics-in-power-systems-whitepaper.pdf>

27. Addressing Harmonics in Power Distribution: Effects and Mitigation Techniques
https://www.researchgate.net/publication/386880473_Address_Harmonics_in_Power_Distribution_Effects_and_Mitigation_Techniques

28. Фільтри гармонік | Ключ до здорової енергомережі.
<https://aktif.net/en/harmonic-filters-the-key-to-a-healthy-power-grid/>

29. Активні чи пасивні фільтри гармонік.
<https://meruspower.com/news/ensuring-power-quality-and-improving-energy-efficiency-with-merus-active-filter-technology-will-contribute-to-the-success-of-the-significant-infrastructure-project-in-egypt/>

30. <https://www.elevify.com/ukua/%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D0%B8/%D1%96%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%96%D1%8F-%D0%B1%D1%83%D0%B4%D1%96%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE-%D1%82%D0%B0-7582c>
31. Як гармоніки впливають на трансформатори?
<https://taishantransformer.com/harmonics-effect-on-transformers/>
32. Distribution Transformer-Impact of Harmonics-IEEE Format-2
https://www.academia.edu/6676494/Distribution_Transformer_Impact_of_Harmonics_IEEE_Format_2
33. Harmonic Analysis of Power Converters & Its Mitigation by Using Passive Filters.
https://www.academia.edu/10604638/Harmonic_Analysis_of_Power_Converters_and_Its_Mitigation_by_Using_Passive_Filters
34. Гармонічні фільтри. <https://enerdoor.com/product-category/harmonic-filters/>
35. Analysis of the Working Principle of 12 Pulse Inverter Bridge.
https://www.researchgate.net/publication/303860776_Analysis_of_the_Working_Principle_of_12_Pulse_Inverter_Bridge
36. 12-імпульсний перетворювач, включаючи дросель фільтра, вбудований у випрямляч. <https://patents.google.com/patent/US7277302B2/en>
37. Active Filters.
https://uomus.edu.iq/img/lectures21/MUCLecture_2025_21548546.pdf
38. Types of Active Filters. <https://aec-iitkgp.vlabs.ac.in/exp/active-filter/theory.html>
39. Аналіз топологічних особливостей активних випрямлячів https://vlp.com.ua/files/05_13.pdf
40. Active front end drive versus active filter solutions Decentralized vs.

centralized mitigation strategies/

https://library.e.abb.com/public/74ff1e10c3214d5fa4b9cccc421768c3/Technical_Note_060_Activefrontend_drive_versusactivefilter_solutions.pdf