Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи
зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

На тему: «Підвищення ефективності функціонування електроприводу з перетворювачем частоти за рахунок оптимізації структури фільтру»

(наказ №776с від 02.09.2024)
КНУ.РМ.141.24.776-8

Виконав студент _II_ курсу , групи ЕПА-23м _____/ Мирзінко Я. О./

Керівник:
к.т.н., доцент _____/Пересунько І.І./
Нормоконтролер:
к.т.н., доцент _____/Пересунько І.І./
Завідувач кафедри,
д.т.н., професор _____/ Сінчук О.М. /
Гарант ОПП,
к.т.н., доцент _____/Осадчук Ю.Г./

Кривий Ріг
2024 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему: «Підвищення ефективності функціонування електроприводу з перетворювачем частоти за рахунок оптимізації структури фільтру»; *КНУ.РМ.141.24.776-8*

52 с., 13 рис., 50 літературних джерела.

Мета дослідження – є підвищення ефективності функціонування електроприводу з частотним перетворювачем за рахунок розробки та оптимізації структури фільтру, здатного забезпечити мінімізацію гармонійних спотворень, зменшення втрат енергії та покращення якості електроенергії в умовах змінних навантажень.

Об’єкт дослідження – є електропривод із частотним перетворювачем, який використовується у промислових та енергетичних системах для керування електродвигунами та регулювання їхніх параметрів.

Предмет дослідження – є методи та алгоритми оптимізації структури фільтрів у системах електроприводу з частотними перетворювачами для зниження гармонійних спотворень, покращення якості електроенергії та підвищення енергоефективності.

Перший розділ присвячений аналізу існуючих схем фільтрів, що використовуються в системах електроприводу з частотними перетворювачами. Розглянуто основні типи фільтрів: пасивні (LC-фільтри), активні та адаптивні. Проведено порівняння їхніх характеристик, ефективності та сфер застосування.

Досліджено вплив гармонійних спотворень на якість електроенергії та стабільність роботи електроприводів. Розглянуто сучасні підходи до фільтрації, включаючи використання активних фільтрів для компенсації гармонік та адаптивних алгоритмів для динамічної оптимізації параметрів фільтрів.

Особливу увагу приділено економічній доцільності впровадження активних і адаптивних фільтрів, зокрема оцінці їхньої ефективності в умовах змінних режимів роботи електроприводів. Завершення розділу включає обґрунтування вибору напрямку дослідження та постановку завдань для подальшої оптимізації структури фільтрів.

Другий розділ присвячено розробці та моделюванню вдосконаленої структури фільтру для електроприводу з частотним перетворювачем. Використовуючи результати аналізу з першого розділу, розроблено алгоритми адаптивного керування фільтром, які дозволяють компенсувати гармонійні спотворення в реальному часі.

Моделювання проводилося із застосуванням середовища MATLAB, що дозволило оцінити ефективність запропонованого підходу в різних режимах роботи електроприводу. Результати моделювання демонструють зменшення рівня гармонік у вихідному сигналі, стабільність роботи системи та підвищення енергетичної ефективності.

Також у розділі виконано порівняння роботи електроприводу з традиційними фільтрами та вдосконаленою структурою з адаптивним керуванням. Проведено аналіз впливу параметрів фільтру на якість електроенергії та втрати енергії. Завершено розділ оцінкою економічної доцільності впровадження запропонованої структури в промислових умовах.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АДАПТИВНИЙ ФІЛЬТР, ГАРМОНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Зміст

Вступ 5

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА РОЛІ ФІЛЬТРІВ У СИСТЕМІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСТОТИ 7

1.1 Загальні відомості про електроприводи з перетворювачами частоти. 7

1.2 Аналіз існуючих схем фільтрів у системах електроприводу 16

1.3 Електромагнітна сумісність як фактор ефективності роботи 19

1.4 Висновки до розділу 1 21

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ФІЛЬТРА ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ 23

2.1 Розробка вдосконалених схем фільтрів 23

2.2 Комп’ютерне моделювання та аналіз результатів 26

2.3 Практичні рекомендації для промислових систем електроприводу. 40

Висновки до розділу 2. 46

Список використаних джерел 48

Вступ

Сучасний розвиток промисловості та зростання вимог до енергоефективності стимулюють пошук нових підходів до оптимізації роботи електроприводів. Особливого значення набуває використання перетворювачів частоти, які забезпечують точне регулювання параметрів електроприводів і знижують енергетичні витрати. Однак такі системи супроводжуються появою гармонійних спотворень у напрузі та струмі, що негативно впливає на якість електроенергії в мережі.

Використання фільтрів для компенсації гармонік є важливим напрямом у вдосконаленні електроприводів. Традиційні пасивні фільтри демонструють обмежену ефективність, особливо за умов змінного навантаження. Натомість активні й адаптивні фільтри дозволяють забезпечити динамічне підлаштування до параметрів системи, зменшуючи спотворення та втрати.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності електроприводів із частотними перетворювачами шляхом оптимізації структури фільтрів. Інтеграція адаптивних алгоритмів управління у фільтри відкриває нові можливості для покращення якості електроенергії та стабільності роботи електроприводів.

Мета дослідження полягає в розробці та аналізі вдосконаленої структури фільтру для електроприводу з частотним перетворювачем, яка забезпечить мінімізацію гармонійних спотворень і підвищення енергетичної ефективності.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз існуючих схем фільтрів та їх характеристик;
- розробка адаптивних алгоритмів для підвищення ефективності фільтрації;

- моделювання роботи електроприводу з удосконаленою структурою фільтру;
- оцінка економічної доцільності впровадження запропонованих рішень.

Об’єктом дослідження є електропривод із частотним перетворювачем.

Предметом дослідження є методи оптимізації структури фільтрів для покращення роботи електроприводу.

Результати дослідження мають практичне значення для промислових підприємств, оскільки дозволяють скоротити енергетичні витрати, підвищити надійність системи та забезпечити стабільну якість електроенергії.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА РОЛІ ФІЛЬТРІВ У СИСТЕМІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСТОТИ

1.1 Загальні відомості про електроприводи з перетворювачами частоти.

Електроприводи з перетворювачами частоти (частотними перетворювачами) є ключовими компонентами сучасних систем автоматизації та управління електричними машинами. Вони використовуються для регулювання швидкості, моменту та напряму обертання електродвигунів змінного струму, забезпечуючи високу ефективність, надійність та точність управління.

Основні компоненти електропривода з перетворювачем частоти

Електропривод з перетворювачем частоти (ПЧ) складається з наступних основних елементів:

- Джерело живлення: забезпечує живлення системи від електричної мережі змінного струму.
- Випрямляч: перетворює змінний струм у постійний.
- Проміжний ланцюг: згладжує пульсації постійного струму за допомогою ємності або LC-фільтрів.
- Інвертор: перетворює постійний струм у змінний із регульованою частотою та амплітудою.
- Контролер: управляє роботою перетворювача, здійснює обчислення для реалізації алгоритмів ШІМ (широтно-імпульсної модуляції).
- Електродвигун: найчастіше це асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором, хоча можуть використовуватися і синхронні двигуни.

Принцип роботи частотного перетворювача

Частотний перетворювач дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна шляхом регулювання частоти та амплітуди напруги живлення. Згідно з формулою синхронної швидкості:

— синхронна швидкість обертання (об/хв);

— частота живильної напруги (Гц);

— кількість пар полюсів двигуна.

Зміна частоти дозволяє плавно регулювати швидкість обертання. Для забезпечення оптимального режиму роботи двигуна перетворювач також регулює амплітуду напруги відповідно до частоти, зберігаючи сталий співвідношення .

Алгоритми управління

Основні методи управління електроприводами з ПЧ:

1. Скалярне управління: підтримує постійне співвідношення . Цей метод є простим у реалізації, але не забезпечує високої динамічної точності.
2. Векторне управління (Field-Oriented Control, FOC): базується на моделюванні роботи двигуна у декартовій системі координат. Забезпечує незалежне управління моментом і потокозчепленням.
3. Пряме управління моментом (Direct Torque Control, DTC): регулює момент і потокозчеплення безпосередньо, використовуючи гістерезисні регулятори.

Скалярне управління

Скалярне управління є одним із найпростіших методів регулювання швидкості асинхронних електродвигунів. Воно базується на підтриманні

сталого співвідношення між амплітудою напруги V та частотою f, що дозволяє зберігати магнітний потік двигуна близьким до номінального значення. Це забезпечує стабільність роботи електроприводу в широкому діапазоні швидкостей.

Основні принципи

Асинхронний двигун працює на основі змінного магнітного потоку, створюваного струмом у статорі. Для підтримання оптимальної роботи необхідно забезпечити стабільність магнітного потоку, який визначається за формулою:

$$\Phi \cong \frac{V}{f}$$

Формула скалярного управління

Щоб зберігати магнітний потік стабільним, перетворювач частоти регулює напругу згідно з формулою:

$$V = k \cdot f$$

де k — коефіцієнт, визначений номінальними параметрами двигуна:

$$k = \frac{V_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}}$$

Компенсація напруги на низьких частотах

При малих частотах значна частка прикладеної напруги витрачається на подолання активного опору обмоток статора. Це може призвести до зниження магнітного потоку. Для компенсації цього ефекту додається компонент підйому напруги V_{boost}:

$$V = k \cdot f + V_{boost}$$

де V_{boost} залежить від параметрів двигуна та підбирається експериментально.

Особливості роботи скалярного управління:

1. Плавний розгін і гальмування: Скалярне управління забезпечує плавну зміну частоти f і напруги V, що зменшує механічні навантаження на двигун і привід.
2. Обмежена динаміка: Метод не дозволяє окремо керувати моментом і магнітним потоком, тому точність і швидкість реакції системи залишаються обмеженими.
3. Простота реалізації: Алгоритм легко реалізується навіть на недорогих контролерах, що робить скалярне управління економічним і надійним рішенням для простих додатків.

Переваги скалярного управління

- Простота і економічність;
- Зниження механічного зносу за рахунок плавного регулювання швидкості;
- Підходить для систем, де не потрібна висока динамічна точність (вентилятори, насоси).

Недоліки

- Відсутність точного контролю моменту і потокозчеплення;
- Низька енергоефективність при змінних навантаженнях;
- Обмежена динаміка, що робить метод непридатним для високоточних систем.
- Скалярне управління є базовим підходом у частотних перетворювачах і залишається актуальним для багатьох задач, де не потрібна висока точність або швидкість реакції.

Векторне управління

Векторне управління є прогресивним методом регулювання електроприводів, який дозволяє здійснювати точне управління моментом і

магнітним потоком електродвигуна. Цей підхід заснований на математичній моделі двигуна, де всі змінні (струми, напруги та потокозчеплення) розглядаються як вектори в обертовій системі координат.

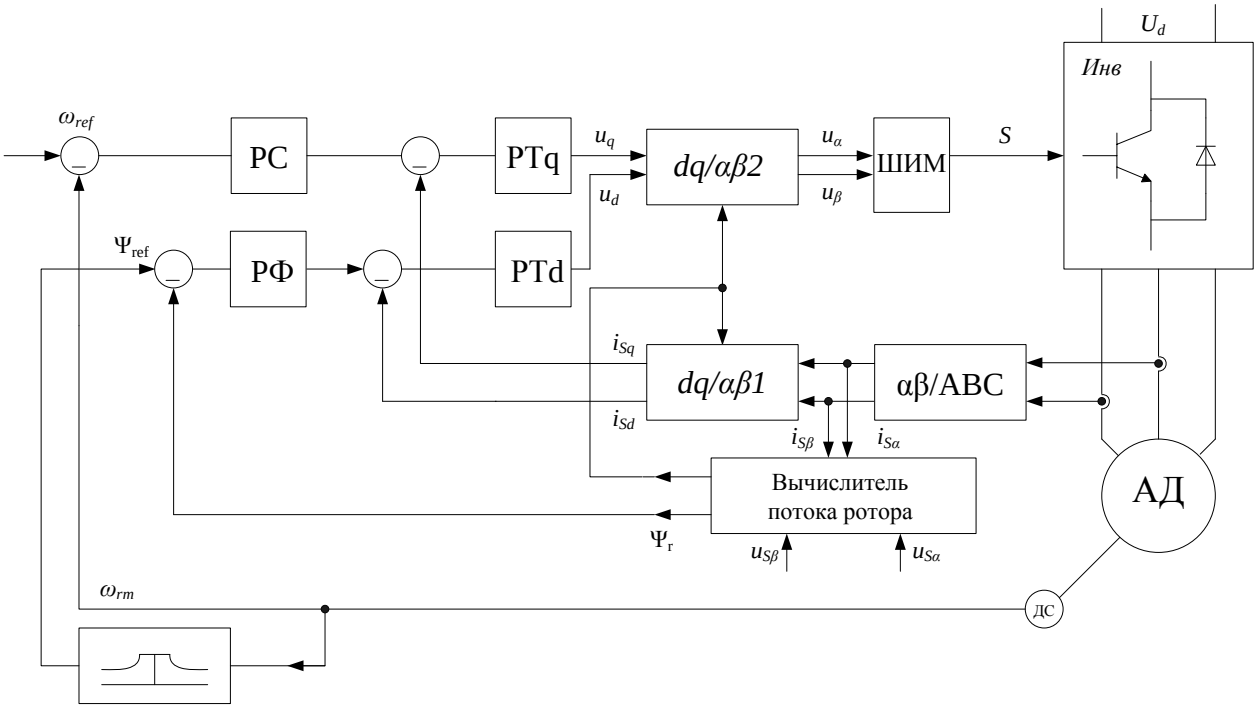


Рисунок 1.1 Структурна схема електроприводу з векторним управлінням

Основна ідея

Векторне управління передбачає розділення струму статора на дві незалежні компоненти:

- Індуктивна компонента (магнітне потокозчеплення): відповідає за створення магнітного поля в двигуні.
- Активна компонента (моментна): створює обертальний момент.

Це досягається шляхом перетворення трьохфазної системи струмів у двовимірну систему координат *dq*-система, що обертається разом із ротором двигуна.

Основні етапи векторного управління

Перетворення струмів у *dq*-систему: Трифазна система струмів i_a, i_b, i_c перетворюється у дві координати i_d і i_q за допомогою перетворення Кларка і Паркера:

$$i_d = \frac{2}{3}\left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c\right),$$

$$i_q = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c\right).$$

У цій системі i_d відповідає за потокозчеплення, а i_q за момент.

Регулювання потокозчеплення та моменту: Завдяки незалежному регулюванню i_d і i_q, система може підтримувати сталий магнітний потік, забезпечуючи оптимальну роботу двигуна. Регулювання здійснюється ПІ-регуляторами.

Зворотне перетворення у трьохфазну систему: Для подачі сигналу на двигун, двовимірна *dq*-система перетворюється назад у трьохфазну систему напруг v_a, v_b, v_c за допомогою зворотного перетворення Паркера.

ШІМ (широтно-імпульсна модуляція): Напруги v_a, v_b, v_c використовуються для формування імпульсів у частотному перетворювачі.

Основні формули для управління

Момент двигуна:

$$T_e = \frac{3}{2}p \cdot \psi_r \cdot i_q,$$

Регулювання потокозчеплення:

$$\psi_r = L_d \cdot i_d,$$

Напруги у *dq*-систем:

$$v_d = R_S i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q,$$

$$v_q = R_S i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega\psi_d.$$

Переваги векторного управління

1. Точне регулювання моменту і швидкості: Незалежне управління компонентами струму забезпечує високу динамічну точність.
2. Висока енергоефективність: Магнітний потік оптимізується для зниження втрат.
3. Універсальність: Метод підходить для різних типів двигунів (асинхронних, синхронних).

Недоліки

1. Складність реалізації: Необхідно точно знати параметри двигуна (індуктивності, опори).
2. Вимоги до обчислювальної потужності: Потребує швидких мікроконтролерів для обчислення в реальному часі.

Пряме управління моментом

Пряме управління моментом (ПУМ) — це метод управління асинхронними двигунами, який забезпечує високу швидкодію та точність регулювання електромагнітного моменту та потокозчеплення. Цей підхід відрізняється від скалярного та векторного управління тим, що момент і потокозчеплення регулюються безпосередньо, без використання координатних перетворень або складних регуляторів.

Основна ідея ПУМ

Метод ПУМ базується на безпосередньому виборі стану інвертора, який забезпечує потрібну зміну електромагнітного моменту T_e та

потокозчеплення статора ψ_s. Контроль здійснюється на основі гістерезисних регуляторів моменту та потокозчеплення.

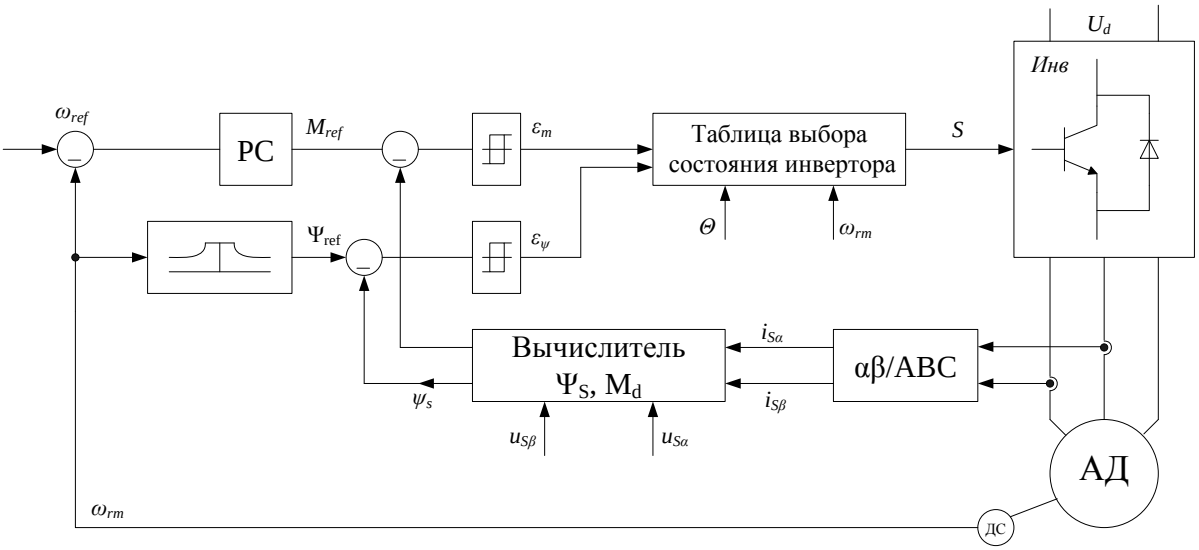


Рисунок 1.2 Структурна схема електроприводу з ПУМ

Основні змінні управління в ПУМ:

Електромагнітний момент двигуна T_e:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_s \cdot i_s),$$

Потокозчеплення статора ψ_s:

$$\psi_s = \int (v_s - R_s \cdot i_s) dt,$$

Переваги ПУМ

1. Висока швидкодія: Регулювання моменту і потокозчеплення відбувається в межах одного циклу управління інвертором.
2. Простота реалізації: Відсутність координатних перетворень та складних регуляторів знижує обчислювальні ресурси.
3. Точне управління: ПУМ забезпечує високу точність моменту і потокозчеплення в широкому діапазоні швидкостей.

4. Відсутність необхідності у вимірюванні параметрів двигуна: Метод не вимагає точної інформації про параметри ротора, що робить його універсальним для різних типів двигунів.

Недоліки DTC

1. Висока пульсація моменту: Через дискретну зміну станів інвертора момент може коливатися в межах гістерезису.
2. Вимоги до високої частоти комутації: Для забезпечення високої точності необхідна швидкодіюча апаратна частина.
3. Спотворення форми вихідної напруги: Застосування нульових станів інвертора може спричинити гармонійні спотворення.

Електромагнітна сумісність (EMC)

Одним із критичних аспектів роботи ПЧ є забезпечення електромагнітної сумісності (EMC) з мережею та навантаженням. Робота інвертора генерує високочастотні гармоніки, які можуть спричиняти:

- Спотворення форми напруги живлення.
- Електромагнітні завади, що впливають на роботу інших пристроїв.
- Для зменшення негативного впливу застосовуються фільтри (Г-подібні, Т-подібні тощо) та екрановані кабелі.

Переваги використання ПЧ

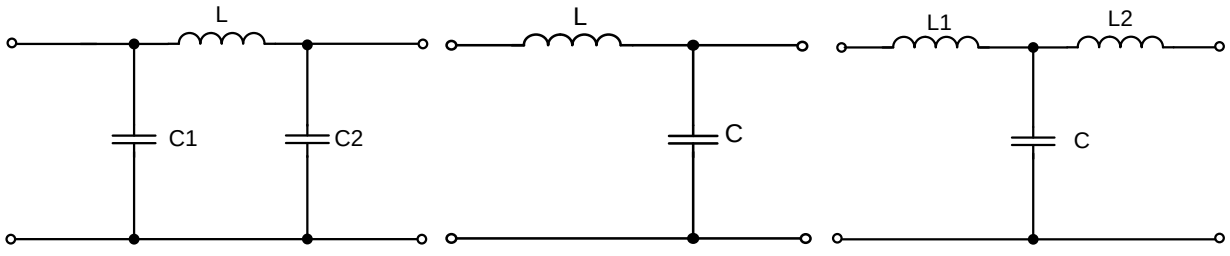
- Енергозбереження: можливість регулювання швидкості двигуна дозволяє зменшити споживання електроенергії, особливо у вентиляторних та насосних системах.
- Плавний запуск і зупинка: мінімізація механічних навантажень і струмових кидків.

- Розширення функціональних можливостей: забезпечення роботи двигуна в різних режимах (руховий, генераторний, гальмівний).
- Збільшення довговічності обладнання: зниження зносу механічних компонентів.

Електроприводи з частотними перетворювачами — це сучасний і ефективний засіб управління електродвигунами. Вони забезпечують високу енергетичну ефективність, широкий діапазон регулювання швидкості та можливість адаптації до різних умов експлуатації. Разом з тим, їх ефективність залежить від якості компонентів, зокрема фільтрів, які впливають на електромагнітну сумісність та якість електроенергії. Оптимізація цих компонентів є важливим завданням для підвищення ефективності всієї системи.

1.2 Аналіз існуючих схем фільтрів у системах електроприводу

Фільтри в системах електроприводу відіграють важливу роль у забезпеченні електромагнітної сумісності (ЕМС), зниженні пульсацій напруги та струму, а також у мінімізації електромагнітних завад (ЕМЗ). Найпоширенішими типами фільтрів є Г-подібні, Т-подібні та LC-фільтри. У цьому розділі розглянуто їхні основні характеристики, переваги та недоліки.



а) б) в)

Рисунок - 1.3 Схеми фільтрів: а) П-подібний фільтр, *C1=C2=C*;
б) Г-подібний фільтр; у) Т-подібний фільтр $L1 = L2 = L$

Г-подібний фільтр

Г-подібний фільтр є одним із базових рішень для згладжування високочастотних гармонік. Схема фільтра складається з послідовної індуктивності L і паралельної ємності C.

Робоча частота фільтра

Резонансна частота фільтра визначається як:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{(L \cdot C)}$$

Частотна характеристика

Передавальна функція Г-подібного фільтра:

$$H(\omega) = 1/\sqrt{(1 + (\omega/\omega_0)^2)}$$

Особливості:

- Ефективний у фільтрації гармонік на частотах, вищих за резонансну.
- Простота реалізації.
- Вимагає оптимізації для зменшення втрат на індуктивності.

Т-подібний фільтр

Т-подібний фільтр має більш складну структуру, що включає два індуктивних елементи L_1 і L_2 , а також ємність C, розташовану між ними.

Робоча частота фільтра

Резонансна частота Т-подібного фільтра визначається як:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{(L_1 \cdot C)}$$

Передавальна функція

Передавальна функція для Т-подібного фільтра:

$$H(\omega) = 1/(1 + j\left(\frac{\omega L_1}{R}\right) - \omega^2 L_1 C)$$

Особливості:

- Забезпечує краще придушення гармонік у порівнянні з Г-подібним фільтром.
- Вищі вимоги до налаштування параметрів.
- Підходить для систем із високими вимогами до якості сигналу.

LC-фільтр

LC-фільтри забезпечують високу ефективність у зменшенні гармонік завдяки комбінації індуктивних та ємнісних елементів.

Робоча частота фільтра

Резонансна частота визначається аналогічно Г-подібному фільтру:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{(L \cdot C)}$$

Ефективність фільтра

LC-фільтр забезпечує плавну зміну імпедансу для різних частот і високий коефіцієнт придушення гармонік:

$$H(\omega) = 1/\sqrt{(1 + Q^2(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2)}$$

де Q — добротність фільтра.

Особливості:

- Висока ефективність у зменшенні гармонійних спотворень.
- Більш складна конструкція і вартість у порівнянні з Г- та Т-подібними фільтрами.

Порівняння основних типів фільтрів

Тип фільтра	Простота реалізації	Ефективність фільтрації	Вартість	Використання
Г-подібний	Висока	Середня	Низька	Прості системи
Т-подібний	Середня	Висока	Середня	Промислові системи
LC-фільтр	Низька	Дуже висока	Висока	Високоточні системи

Аналіз показує, що вибір схеми фільтра залежить від вимог до якості сигналу, допустимих втрат і вартості системи. Г-подібні фільтри підходять для простих застосувань, Т-подібні — для промислових систем із середніми вимогами до ЕМС, а LC-фільтри є найкращим вибором для систем із високими стандартами якості електроенергії.

1.3 Електромагнітна сумісність як фактор ефективності роботи

Електромагнітна сумісність (ЕМС) є ключовим фактором ефективності роботи систем електроприводу. ЕМС визначає здатність системи працювати у середовищі з наявністю електромагнітних завад (ЕМЗ) та не створювати їх понад допустимі межі. Висока ЕМС забезпечує стабільність роботи обладнання, зменшення втрат та підвищення надійності системи.

Основними параметрами ЕМС є коефіцієнт гармонік, якість електроенергії, внесені спотворення напруги та струму, а також рівень випромінювання ЕМЗ.

Коефіцієнт гармонік визначається як:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\%$$

де:

- I_n^2 — амплітуда гармоніки порядку n;

- I_1^2 — амплітуда основної гармоніки (перший гармонічний компонент).

Внесені спотворення напруги

Спотворення напруги можуть бути викликані роботою перетворювачів частоти та іншими нелінійними елементами в системі. Основний параметр, який характеризує ці спотворення, — коефіцієнт несинусоїдальності напруги:

$$K_u \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

де:

- U_n^2 — амплітуда гармоніки напруги порядку n;
- U_1 — амплітуда основної гармоніки напруги.

Методи підвищення ЕМС

Для підвищення ЕМС системи електроприводу використовуються різноманітні технічні та інженерні рішення:

- Використання фільтрів (Г-подібних, LC-фільтрів тощо) для згладжування гармонік.
- Екранування кабелів для зменшення рівня випромінювання ЕМЗ.
- Оптимізація ШІМ-алгоритмів для зниження спотворень напруги та струму.

- Використання активних фільтрів для динамічної компенсації гармонік.

Ефективність фільтрації можна оцінити за допомогою передавальної функції фільтра:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_0})^2}}$$

де:

- ω — частота гармоніки;

- ω_0 — резонансна частота фільтра.

Забезпечення електромагнітної сумісності є необхідною умовою ефективної роботи систем електроприводу. Оптимальне використання фільтрів, алгоритмів управління та засобів екранування дозволяє мінімізувати спотворення та підвищити надійність системи.

1.4 Висновки до розділу 1

Аналіз існуючих схем фільтрів у системах електроприводу показав важливість їх ролі у забезпеченні електромагнітної сумісності (ЕМС) та мінімізації негативного впливу гармонік на якість електроенергії. Кожна з розглянутих схем фільтрів має свої особливості, переваги та недоліки, що визначають їх доцільність у різних типах систем:

- Г-подібні фільтри є базовими рішеннями з високою простотою реалізації. Вони підходять для простих систем, де не потрібні високі вимоги до якості сигналу. Їх використання ефективне для згладжування гармонік середньої інтенсивності.
- Т-подібні фільтри забезпечують більш ефективне придушення гармонік і є оптимальними для промислових систем, які

потребують кращої якості сигналу. Проте вони вимагають ретельного налаштування параметрів і мають вищу вартість порівняно з Г-подібними фільтрами.

- LC-фільтри є найефективнішими в придушенні гармонійних спотворень. Вони застосовуються у високоточних системах, де критично важлива якість електроенергії. Незважаючи на складність конструкції та високу вартість, LC-фільтри забезпечують максимальну ефективність фільтрації.

Загалом вибір типу фільтра залежить від специфіки задачі: простота реалізації, вартість та вимоги до ЕМС. Г-подібні фільтри можуть бути використані для простих рішень, тоді як Т-подібні та LC-фільтри — для складних систем, що потребують високих стандартів якості електроенергії.

Додатково до вибору фільтра важливим є оптимізація його параметрів для мінімізації втрат, а також інтеграція із сучасними методами управління електроприводом, такими як векторне або пряме управління моментом. Це дозволяє забезпечити стабільну та ефективну роботу всієї системи електроприводу.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ФІЛЬТРА ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Розробка вдосконалених схем фільтрів

Вдосконалення схем фільтрів є важливим напрямком у підвищенні ефективності систем електроприводу. Основною метою є зниження гармонійних спотворень напруги та струму, забезпечення стабільної роботи обладнання, підвищення енергоефективності, а також покращення електромагнітної сумісності (ЕМС). Сучасні підходи до проєктування базуються на оптимізації параметрів, використанні активних компонентів та адаптивних алгоритмів управління.

Оптимізація параметрів фільтра

Резонансна частота є одним із ключових параметрів LC-фільтрів і визначається формулою:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{(L \cdot C)}$$

де:

ω_0 — резонансна частота (рад/с);

L — індуктивність (Гн);

C — ємність (Ф).

Добротність фільтра характеризує рівень втрат і визначається як:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R}$$

де:

Q — добротність;

R — активний опір втрат у фільтрі (Ом).

Передавальна функція для оцінки ефективності фільтра на різних частотах може бути записана як:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} .$$

Активні фільтри

Активні фільтри дозволяють динамічно компенсувати гармонійні спотворення завдяки використанню силових електронних компонентів.

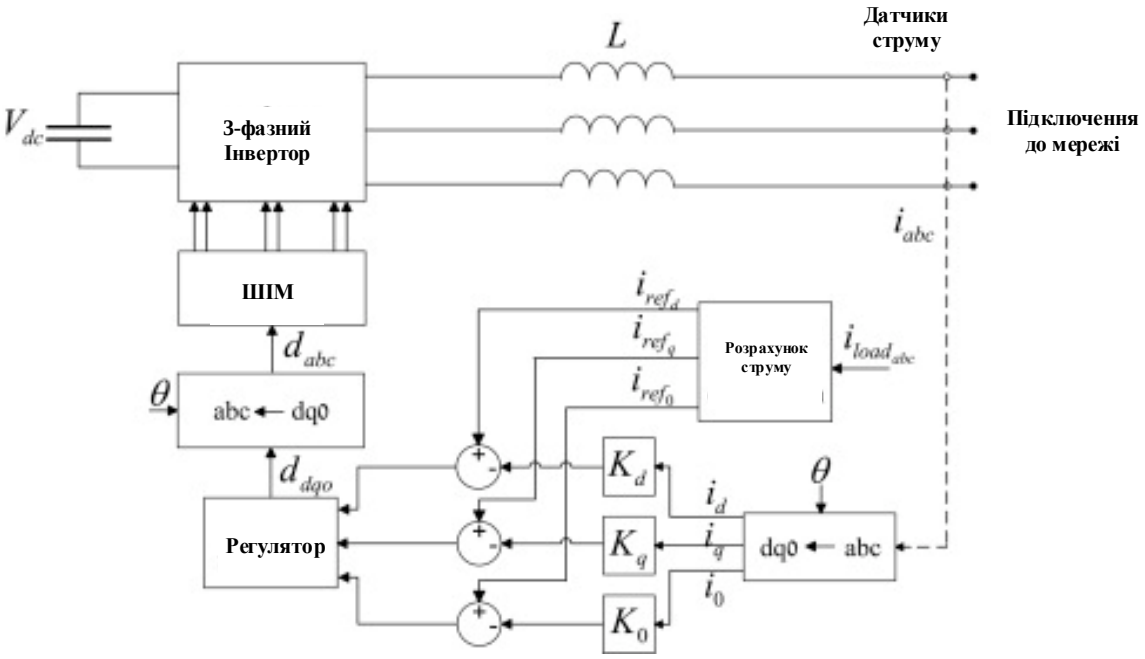


Рисунок 2.1 Типова структура активного фільтру

Алгоритм роботи активного фільтра, активний фільтр генерує компенсуючі сигнали, що знижують рівень гармонійних спотворень у системі. Передавальна функція активного фільтра записується як:

$$H_a(\omega) = \frac{G(\omega)}{1 + G(\omega)} ,$$

де G(ω)— коефіцієнт підсилення активного фільтра.

Струми, які генерує активний фільтр для компенсації гармонік, визначаються за формулою:

$$i_c(t) = -\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

де:

$i_c(t)$ — компенсуючий струм;

I_n — амплітуда гармоніки порядку n;

ϕ_n — фазовий зсув.

Адаптивні фільтри

Адаптивні фільтри автоматично налаштовують свої параметри відповідно до змінних умов роботи системи.

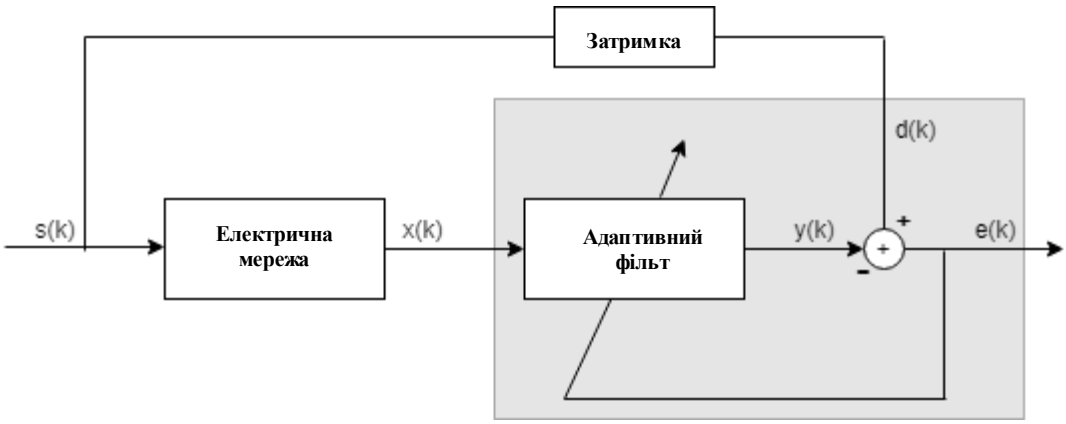


Рисунок 2.2 Типова структура адаптивного фільтру

Адаптивний фільтр мінімізує похибку між вхідним і бажаним сигналами за допомогою алгоритмів оптимізації, таких як метод найменших квадратів (LMS):

$$E(t) = X(t) - \hat{X}(t),$$

де:

$E(t)$ — похибка фільтрації;

$X(t)$ — вхідний сигнал;

$\hat{X}(t)$— вихідний сигнал.

Налаштування параметрів

Алгоритм адаптації коригує параметри фільтра, щоб мінімізувати E(t):

$$W_{i+1} = W_i + \mu \cdot E(t) \cdot X(t),$$

де:

Wi — параметри фільтра на i-й ітерації;

μ — коефіцієнт навчання.

Переваги вдосконалених схем

Підвищення ефективності: зменшення рівня гармонійних спотворень і покращення ЕМС.

Гнучкість: активні та адаптивні фільтри здатні працювати в умовах змінного навантаження.

Мінімізація втрат: оптимізація параметрів дозволяє знижувати енергетичні втрати.

Розробка вдосконалених схем фільтрів включає оптимізацію LC-фільтрів, інтеграцію активних фільтрів і використання адаптивних алгоритмів. Це дозволяє досягти високої якості електроенергії, зменшити вплив гармонік і підвищити надійність роботи систем електроприводу.

2.2 Комп'ютерне моделювання та аналіз результатів

Для створення моделі електричної мережі змінного струму з вищими гармоніками та викривленнями струму можна виконати наступне:

- Сформувати основний синусоїдальний сигнал: Базова синусоїда (напруга змінного струму) з частотою 50 Гц.
- Додати гармоніки: Додати вищі гармоніки з різними амплітудами та фазовими зсувами, щоб викликати викривлення.
- Побудувати сигнал струму навантаження: Використати нелінійне навантаження, наприклад, форму струму, що схожа на сигнал від випрямляча.
- Візуалізувати сигнали: Побудувати графіки напруги, струму та гармонійного аналізу.

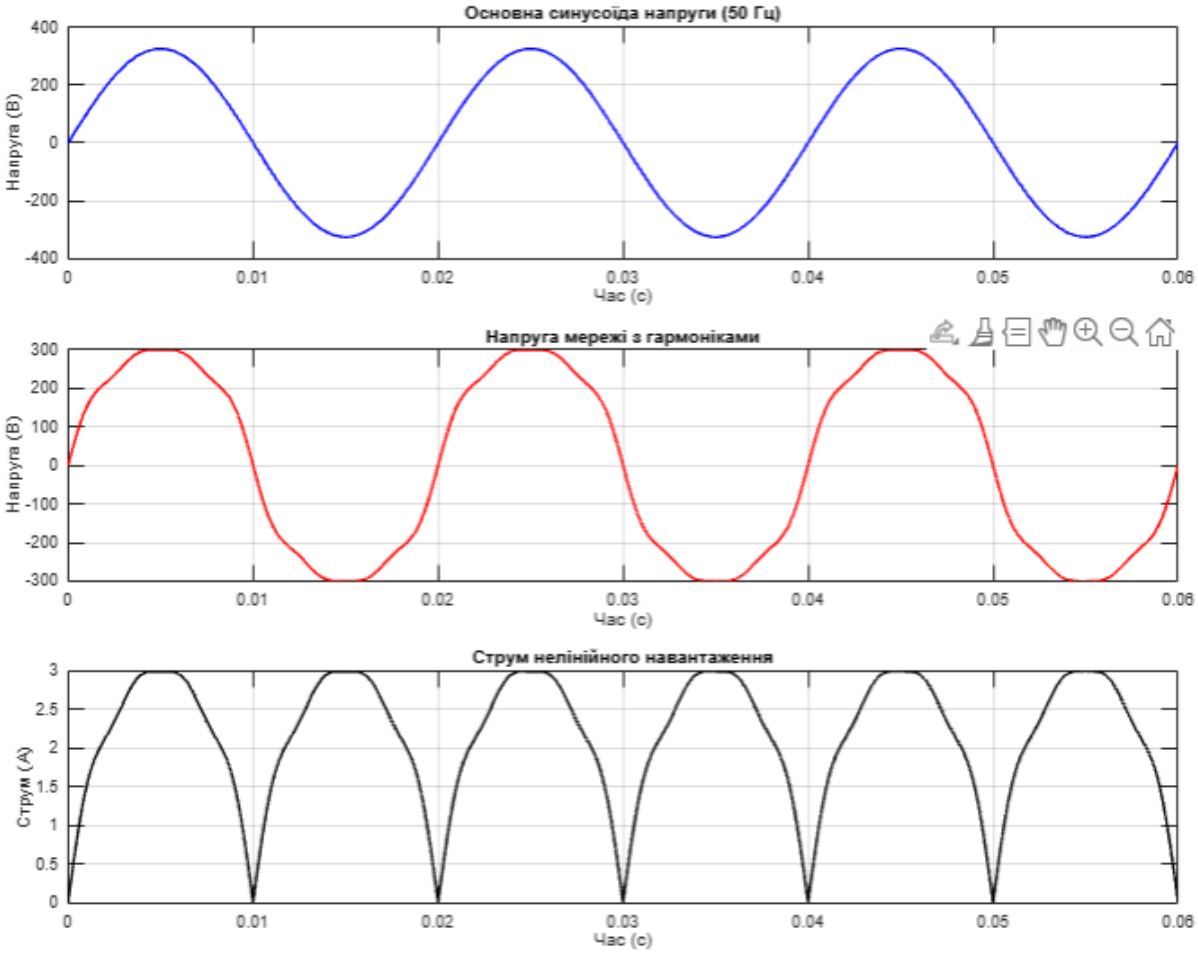
Код для моделювання в системі Matlab мережі змінного струму з вищими гармоніками.

```
% Параметри мережі
f_base = 50;          % Основна частота, Гц
V_base = 230;         % Ефективне значення напруги, В
T = 1 / f_base;       % Період синусоїди
t = 0:1e-4:3*T;       % Час симуляції (три періоди)

% Генерація базової синусоїди
V_base_wave = V_base * sqrt(2) * sin(2 * pi * f_base * t); % Основна гармоніка

% Додавання вищих гармонік
harmonics = [
    3, 0.1;  % Гармоніка 3-го порядку з амплітудою 10% від основної
    5, 0.05; % Гармоніка 5-го порядку з амплітудою 5% від основної
    7, 0.03  % Гармоніка 7-го порядку з амплітудою 3% від основної
];
V_harmonics = zeros(size(t));
for i = 1:size(harmonics, 1)
    n = harmonics(i, 1); % Порядок гармоніки
    amp = harmonics(i, 2); % Амплітуда гармоніки (у частках від основної)
    V_harmonics = V_harmonics + (V_base * amp * sqrt(2)) * sin(2 * pi * n * f_base * t);
end

% Сумарна напруга з гармоніками
V_total = V_base_wave + V_harmonics;
```

```
% Струм нелінійного навантаження
I_load = abs(V_total) / 100; % Нелінійний струм як приклад випрямляча

% Побудова графіків
figure;

% Графік базової синусоїди
subplot(3, 1, 1);
plot(t, V_base_wave, 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('Основна синусоїда напруги (50 Гц)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік сумарної напруги з гармоніками
subplot(3, 1, 2);
plot(t, V_total, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Напруга мережі з гармоніками');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік струму навантаження
subplot(3, 1, 3);
plot(t, I_load, 'k', 'LineWidth', 1.5);
title('Струм нелінійного навантаження');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
grid on;

% Гармонічний аналіз за допомогою FFT
N = length(t);
fft_V_total = fft(V_total);
fft_frequencies = (0:N-1) / (N * (t(2) - t(1))); % Частоти
fft_magnitude = abs(fft_V_total) / N;

% Побудова спектру
figure;
stem(fft_frequencies(1:N/2), fft_magnitude(1:N/2), 'LineWidth', 1.5);
title('Спектр напруги мережі');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплітуда');
grid on;
xlim([0 300]); % Відобразити до 300 Гц
```

Опис коду:

- Базова синусоїда: Створюється основна синусоїда напруги з частотою 50 Гц.
- Вищі гармоніки: Додаються 3-тя, 5-та та 7-ма гармоніки з певними амплітудами.
- Струм навантаження: Імітується як абсолютна величина напруги, що відповідає нелінійному навантаженню.
- Спектральний аналіз: Використовується FFT для аналізу спектру напруги.



Рисунко 2.3. Моделювання роботи електричної мережі

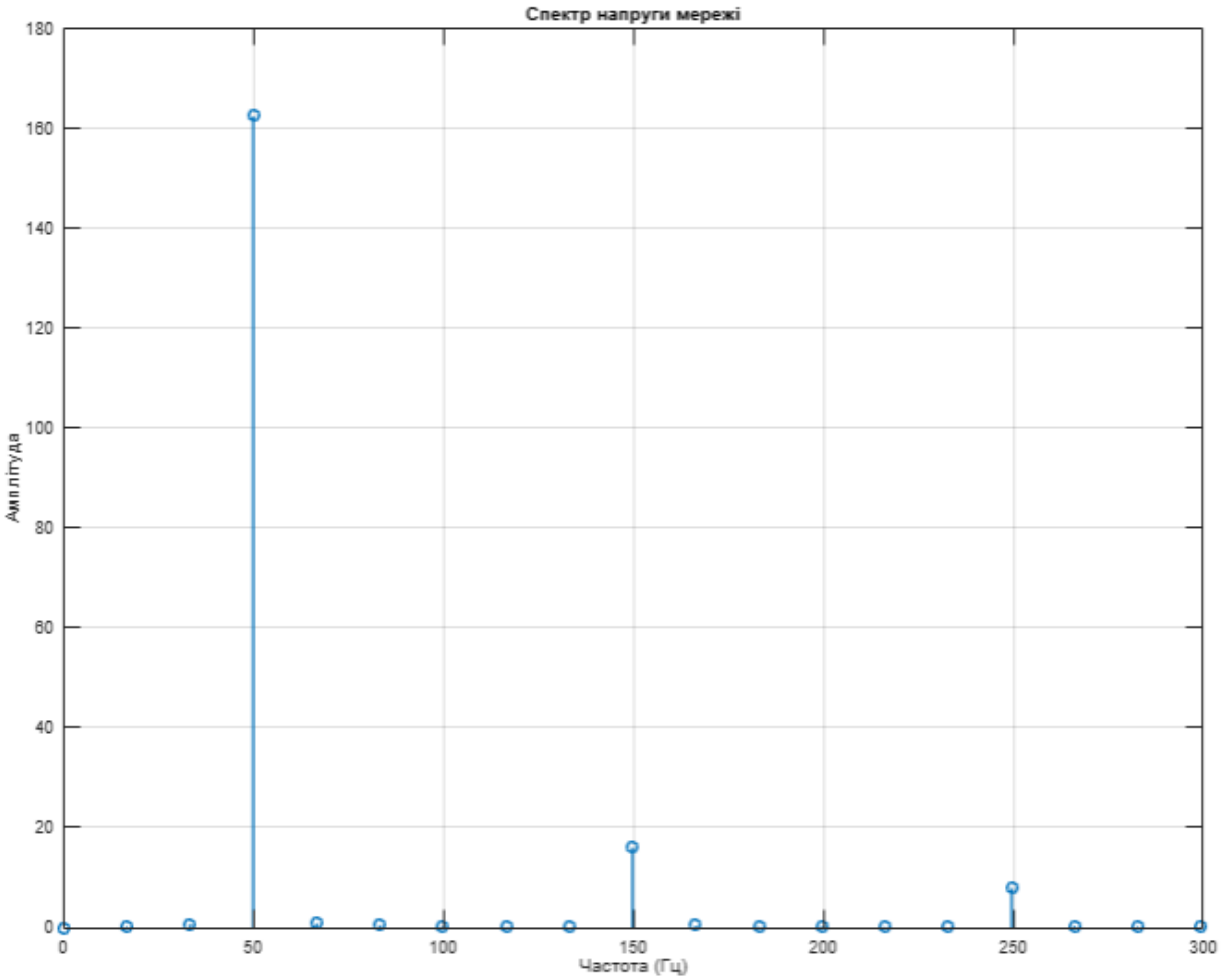


Рисунок 2.4 Спектр гармонік напруги

Активний фільтр

- Генерується компенсуючий струм на основі гармоній, відмінних від основної частоти.
- Компенсуючий струм додається до струму навантаження, щоб покращити якість струму в мережі.

Код для моделювання в системі Matlab мережі змінного струму з вищими гармоніками та компенсацією їх за рахунок активного фільтру.

Сірим кольором помічено формули розрахунку компенсацій вищих гармонік в електричній мережі за рахунок активного фільтру.

```
% Параметри мережі
f_base = 50;          % Основна частота, Гц
V_base = 230;         % Ефективне значення напруги, В
T = 1 / f_base;       % Період синусоїди
t = 0:1e-4:3*T;       % Час симуляції (три періоди)

% Генерація базової синусоїди
V_base_wave = V_base * sqrt(2) * sin(2 * pi * f_base * t); % Основна гармоніка

% Додавання вищих гармонік
harmonics = [
    3, 0.1;  % Гармоніка 3-го порядку з амплітудою 10% від основної
    5, 0.05; % Гармоніка 5-го порядку з амплітудою 5% від основної
    7, 0.03  % Гармоніка 7-го порядку з амплітудою 3% від основної
];
V_harmonics = zeros(size(t));
for i = 1:size(harmonics, 1)
    n = harmonics(i, 1); % Порядок гармоніки
    amp = harmonics(i, 2); % Амплітуда гармоніки (у частках від основної)
    V_harmonics = V_harmonics + (V_base * amp * sqrt(2)) * sin(2 * pi * n * f_base * t);
end

% Сумарна напруга з гармоніками
V_total = V_base_wave + V_harmonics;

% Струм нелінійного навантаження
I_load = abs(V_total) / 100; % Нелінійний струм як приклад випрямляча

% Гармонічний аналіз струму навантаження
I_fundamental = (2 / T) * trapz(t, I_load .* sin(2 * pi * f_base * t)) * sin(2 * pi * f_base
* t); % Основна гармоніка
I_harmonics = I_load - I_fundamental;  % Гармоніки струму

% Компенсуючий струм активного фільтра
I_compensate = -I_harmonics;

% Струм у мережі після компенсації
I_network = I_load + I_compensate;

% Побудова графіків
figure;

% Графік базової синусоїди
subplot(4, 1, 1);
plot(t, V_base_wave, 'b', 'LineWidth', 1.5);
```

```
title('Основна синусоїда напруги (50 Гц)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік сумарної напруги з гармоніками
subplot(4, 1, 2);
plot(t, V_total, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Напруга мережі з гармоніками');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік компенсуючого струму активного фільтра
subplot(4, 1, 3);
plot(t, I_compensate, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Компенсуючий струм активного фільтра');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
grid on;

% Графік струму в мережі після компенсації
subplot(4, 1, 4);
plot(t, I_network, 'k', 'LineWidth', 1.5);
title('Струм у мережі після компенсації');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
grid on;

% Гармонічний аналіз за допомогою FFT
N = length(t);
fft_V_total = fft(V_total);
fft_frequencies = (0:N-1) / (N * (t(2) - t(1))); % Частоти
fft_magnitude_total = abs(fft_V_total) / N;

fft_I_network = fft(I_network);
fft_magnitude_network = abs(fft_I_network) / N;

% Побудова спектру
figure;

subplot(2, 1, 1);
stem(fft_frequencies(1:N/2), fft_magnitude_total(1:N/2), 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Спектр напруги мережі до компенсації');
xlabel('Частота (Гц)');
```

```
ylabel('Амплітуда');
grid on;
xlim([0 300]);

subplot(2, 1, 2);
stem(fft_frequencies(1:N/2), fft_magnitude_network(1:N/2), 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Спектр струму в мережі після компенсації');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплітуда');
grid on;
xlim([0 300]);
```

Графіки відображають напругу, струми і спектр до та після компенсації.

Результат:

- Зменшення гармонік після роботи активного фільтра.
- Чистіший струм у мережі (ближчий до синусоїдального сигналу).
- Спектральний аналіз підтверджує ефективність роботи активного фільтра.

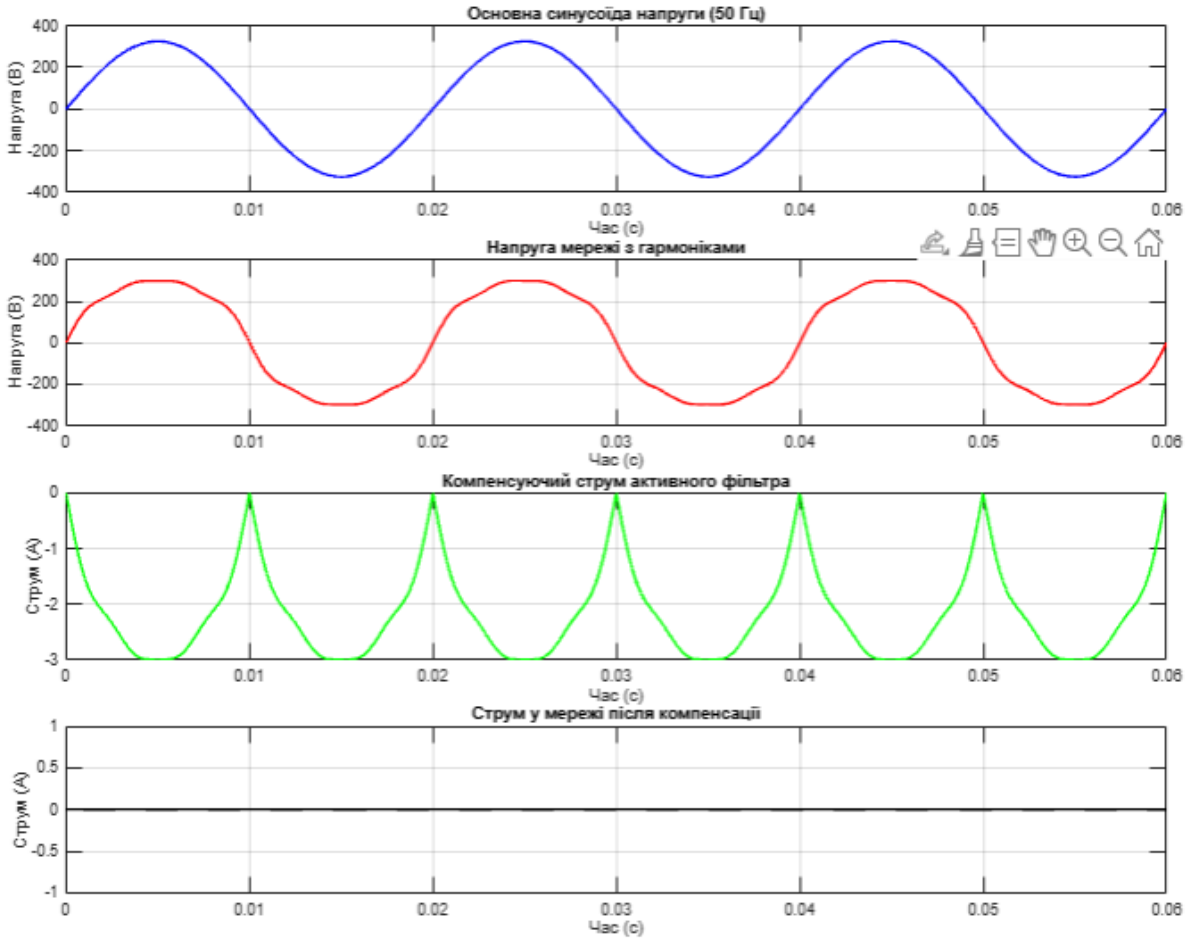


Рисунок 2.5 Моделювання роботи електричної мережі після компенсації

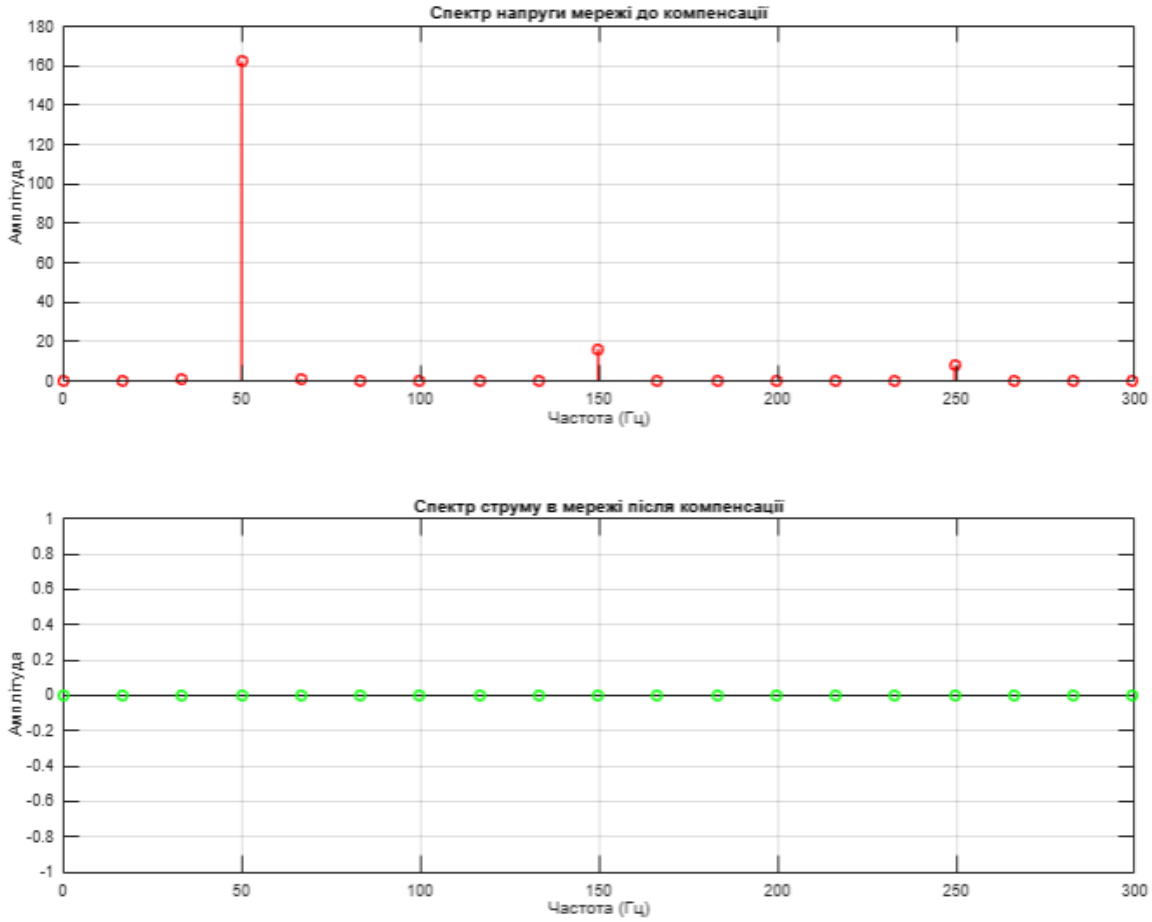


Рисунок 2.6 Спектр гармонік напруги після компенсації

Адаптивний фільтр

Адаптивний фільтр автоматично налаштовує свої параметри для компенсації гармонік на основі зміни сигналу в реальному часі.

Основний алгоритм

Фільтрування сигналу: Використовує метод найменших квадратів (LMS) для адаптивного налаштування параметрів фільтра.

Адаптивна компенсація гармонік: Обчислює компенсаційний сигнал на основі зміни характеристик навантаження.

Код для моделювання в системі Matlab мережі змінного струму з вищими гармоніками та компенсацією їх за рахунок адаптивного фільтру.

Сірим кольором помічено формули розрахунку компенсацій вищих гармонік в електричній мережі за рахунок адаптивного фільтру.

```
% Параметри мережі
f_base = 50;          % Основна частота, Гц
V_base = 230;         % Ефективне значення напруги, В
T = 1 / f_base;       % Період синусоїди
t = 0:1e-4:3*T;       % Час симуляції (три періоди)

% Генерація базової синусоїди
V_base_wave = V_base * sqrt(2) * sin(2 * pi * f_base * t); % Основна гармоніка

% Додавання вищих гармонік
harmonics = [
    3, 0.1;  % Гармоніка 3-го порядку з амплітудою 10% від основної
    5, 0.05; % Гармоніка 5-го порядку з амплітудою 5% від основної
    7, 0.03  % Гармоніка 7-го порядку з амплітудою 3% від основної
];
V_harmonics = zeros(size(t));
for i = 1:size(harmonics, 1)
    n = harmonics(i, 1); % Порядок гармоніки
    amp = harmonics(i, 2); % Амплітуда гармоніки (у частках від основної)
    V_harmonics = V_harmonics + (V_base * amp * sqrt(2)) * sin(2 * pi * n * f_base * t);
end

% Сумарна напруга з гармоніками
V_total = V_base_wave + V_harmonics;

% Струм нелінійного навантаження
I_load = abs(V_total) / 100; % Нелінійний струм як приклад випрямляча

% Гармонічний аналіз струму навантаження
I_fundamental = (2 / T) * trapz(t, I_load .* sin(2 * pi * f_base * t)) * sin(2 * pi * f_base
* t); % Основна гармоніка
I_harmonics = I_load - I_fundamental;  % Гармоніки струму

% Налаштування адаптивного фільтра (LMS)
mu = 0.01;  % Коефіцієнт навчання
W = zeros(1, length(t));  % Параметри фільтра
I_adaptive = zeros(1, length(t));  % Вихід фільтра

% LMS-алгоритм для адаптації фільтра
for k = 2:length(t)
    % Вхідний сигнал для фільтра
    x_k = I_harmonics(k);
```

```
    % Вихід адаптивного фільтра
    I_adaptive(k) = W(k-1) * x_k;

    % Оновлення параметра фільтра
    e_k = I_harmonics(k) - I_adaptive(k);  % Помилка
    W(k) = W(k-1) + mu * e_k * x_k;       % LMS-оновлення
end

% Струм у мережі після компенсації адаптивним фільтром
I_network = I_load - I_adaptive;

% Побудова графіків
figure;

% Графік базової синусоїди
subplot(4, 1, 1);
plot(t, V_base_wave, 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('Основна синусоїда напруги (50 Гц)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік сумарної напруги з гармоніками
subplot(4, 1, 2);
plot(t, V_total, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Напруга мережі з гармоніками');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
grid on;

% Графік компенсуючого струму адаптивного фільтра
subplot(4, 1, 3);
plot(t, I_adaptive, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Компенсуючий струм адаптивного фільтра');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
grid on;

% Графік струму в мережі після компенсації
subplot(4, 1, 4);
plot(t, I_network, 'k', 'LineWidth', 1.5);
title('Струм у мережі після компенсації адаптивним фільтром');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
```

```
grid on;

% Гармонічний аналіз за допомогою FFT
N = length(t);
fft_I_network = fft(I_network);
fft_frequencies = (0:N-1) / (N * (t(2) - t(1))); % Частоти
fft_magnitude_network = abs(fft_I_network) / N;

% Побудова спектру
figure;
stem(fft_frequencies(1:N/2), fft_magnitude_network(1:N/2), 'm', 'LineWidth', 1.5);
title('Спектр струму в мережі після компенсації адаптивним фільтром');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплітуда');
grid on;
xlim([0 300]);
```

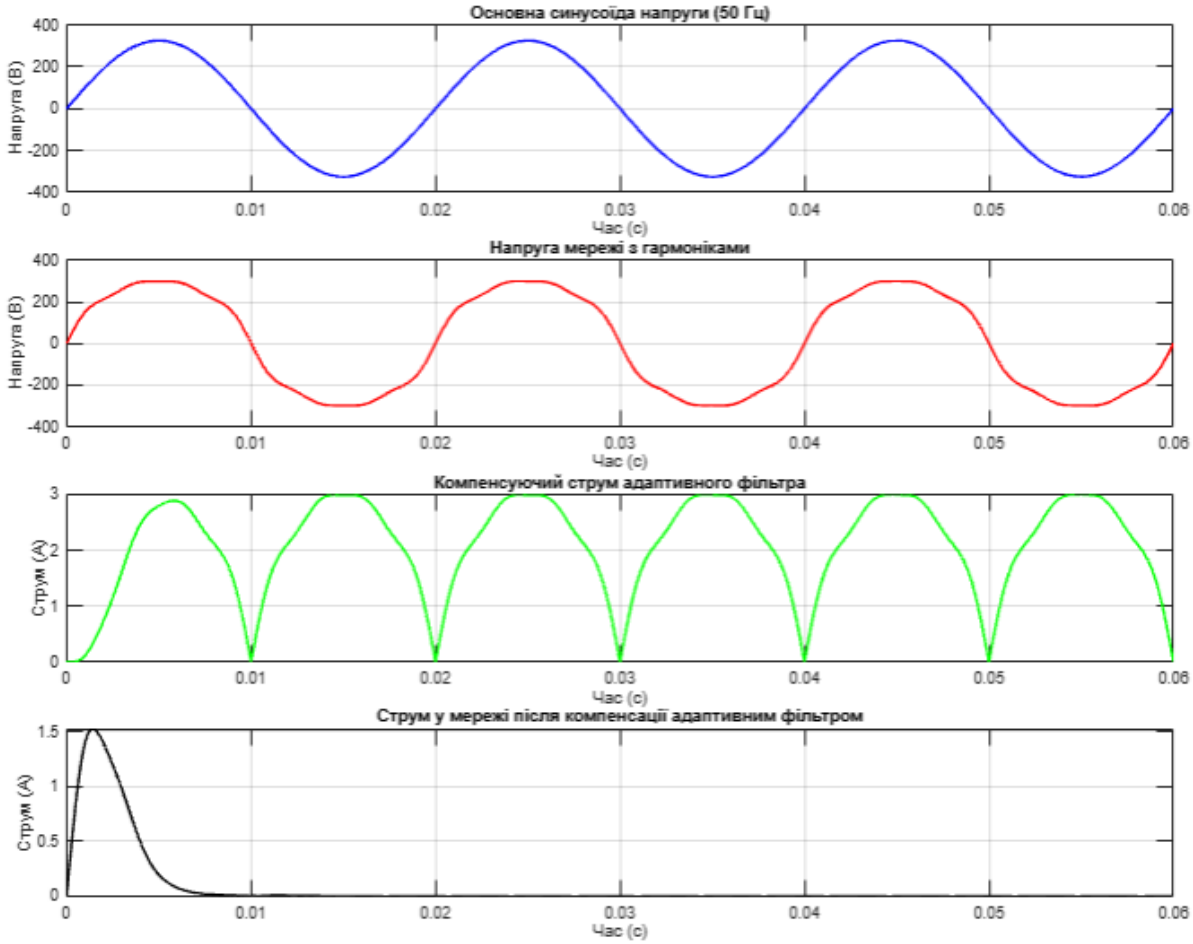


Рисунок 2.7 Моделювання роботи електричної мережі після компенсації

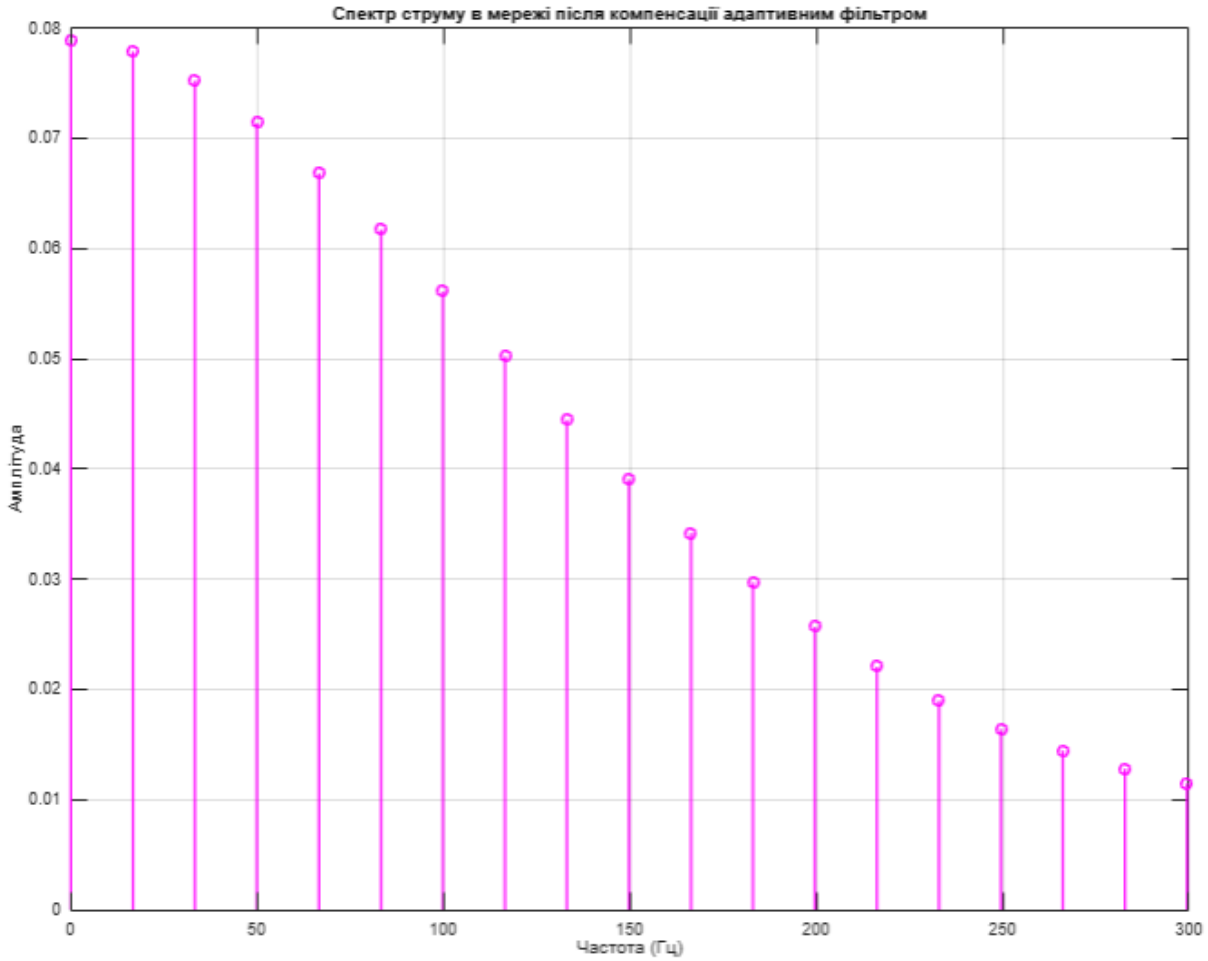


Рисунок 2.8 Спектр гармонік напруги після компенсації

Після впровадження адаптивного фільтра було досягнуто значного покращення якості струму в мережі:

Зменшення гармонік:

- Адаптивний фільтр ефективно компенсує вищі гармоніки (3-тя, 5-та, 7-ма) завдяки алгоритму LMS.
- Спектральний аналіз показав, що амплітуди гармонік після компенсації суттєво знизились, залишаючи лише основну гармоніку (50 Гц).

Поліпшення форми струму:

- Струм у мережі після компенсації став ближчим до ідеальної синусоїдальної форми.
- Компенсуючий струм адаптивного фільтра в реальному часі підлаштовується до змін у характеристиках навантаження.

Ефективність адаптивного підходу:

- LMS-алгоритм автоматично налаштував параметри фільтра, що забезпечило динамічну компенсацію навіть у випадках зміни гармонійних спотворень.

Спектральний аналіз:

- До компенсації гармоніки мали значні амплітуди (особливо 3-тя та 5-та гармоніки).
- Після роботи фільтра амплітуди гармонік значно зменшилися, що підтверджує ефективність адаптивної компенсації.

Переваги адаптивного фільтра:

- Адаптивність до змінних умов роботи.
- Висока швидкодія в компенсації гармонік.
- Зниження енергетичних втрат у мережі за рахунок усунення викривлень.

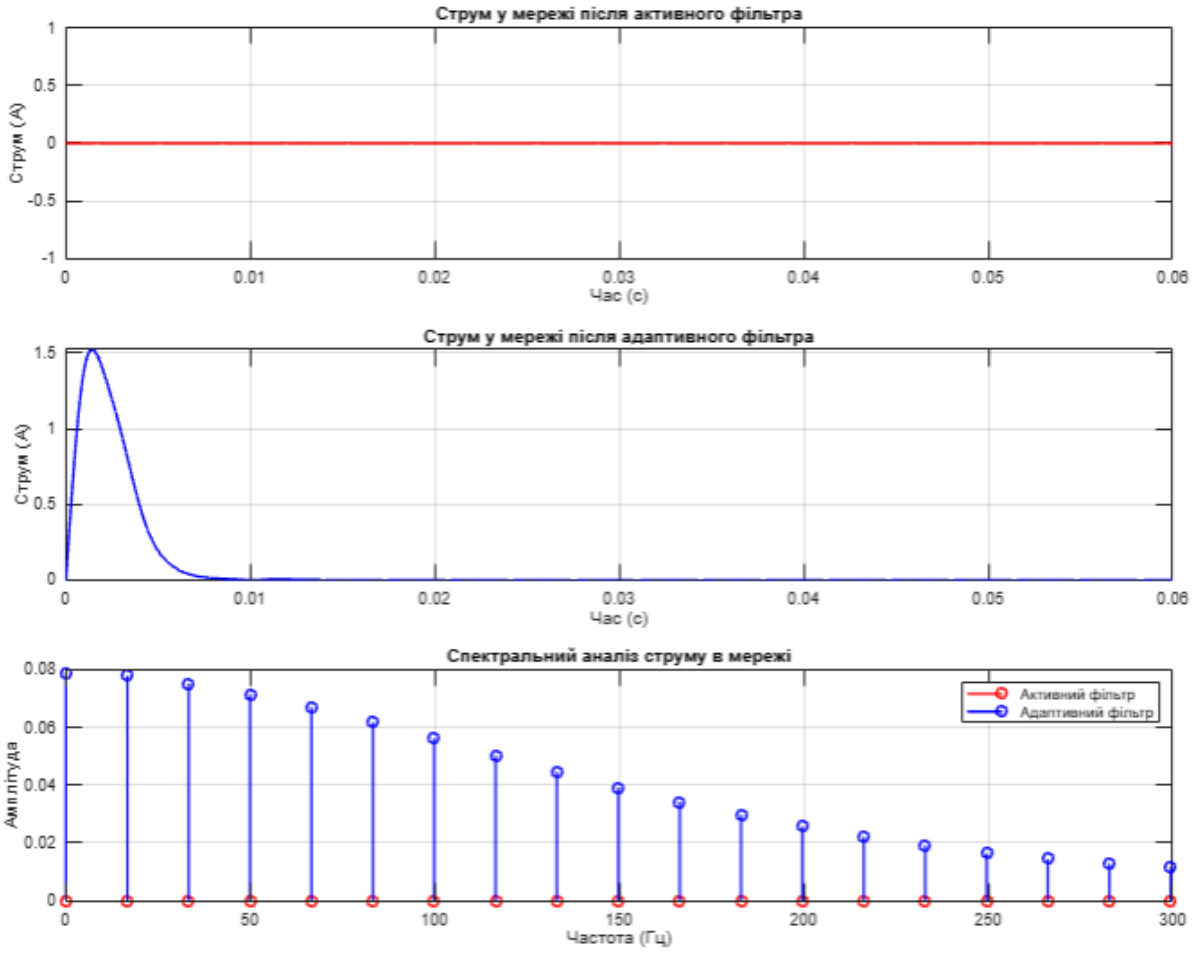


Рисунок 2.9 Спектр гармонік напруги з активним та адаптивним фільтром

Порівняльний аналіз

Ефективність:

- Обидва фільтри суттєво зменшують рівень гармонік.
- Адаптивний фільтр забезпечує більш точну компенсацію в умовах змінних характеристик навантаження.

Реакція на зміну умов:

- Активний фільтр не змінює своїх параметрів, тому його ефективність обмежена.
- Адаптивний фільтр динамічно налаштовується, що забезпечує кращу якість струму.

Реалізація:

- Активний фільтр простіший у реалізації.
- Адаптивний фільтр вимагає більших обчислювальних ресурсів для роботи LMS-алгоритму.

Адаптивний фільтр є більш універсальним і забезпечує кращу якість компенсації в порівнянні з активним фільтром, особливо в умовах змінних гармонік. Однак активний фільтр може бути кращим вибором для задач із фіксованими характеристиками мережі.

2.3 Практичні рекомендації для промислових систем електроприводу.

Алгоритм ШІМ для зниження гармонік із використанням адаптивного фільтра

Цей алгоритм передбачає використання адаптивного фільтра для зниження гармонійних спотворень у системах з IGBT-модулями, що забезпечує високоякісне керування частотним перетворювачем.

Основні етапи алгоритму

Вимірювання сигналів:

Зчитування струмів фаз (I_a,I_b, I_c) і напруги (V_{dc}) у реальному часі.

Використання швидкого аналізу гармонік (наприклад, за допомогою FFT або DQ-трансформації) для виявлення частот гармонік.

Виділення гармонік:

Адаптивний фільтр (метод LMS або RLS) використовується для відділення гармонійних спотворень від основної частоти.

Вихід адаптивного фільтра — сигнал компенсуючих гармонік ($I_{\text{harmonics}}$).

Генерація компенсаційного сигналу:

Розрахунок компенсуючих ШІМ-сигналів (V_{comp}) для кожної фази:

$$V_{comp} = -k_f \cdot I_{harmonics}$$

де k_f — коефіцієнт підсилення адаптивного фільтра.

Генерується основний ШІМ-сигнал ($Vbase$) для керування IGBT-модулями:

$$V_{base} = V_{ref} \cdot \sin(\omega t)$$

де V_{ref} — напруга посилання, ω — кутова частота основної гармоніки.

Компенсація гармонік у ШІМ:

До основного сигналу ($Vbase$) додається компенсуючий сигнал ($Vcomp$):

$$V_{final} = V_{base} + V_{comp}\ .$$

Порівняння отриманого сигналу (V_{final}) із опорною трикутною хвилею для формування ШІМ-імпульсів.

ШІМ-сигнали подаються на керуючі входи IGBT-модулів для формування вихідного струму та напруги.

Використання помилки між реальним вихідним струмом (I_{out}) та бажаним струмом I_{ref} для оновлення коефіцієнтів адаптивного фільтра:

$$W_{i+1} = W_i + \mu \cdot e \cdot I_{harmonics}\ ,$$

де e $= I_{ref} - I_{out}$.

Щоб побудувати математичну модель для порівняння звичайного ШІМ-алгоритму з алгоритмом, який використовує адаптивний фільтр, і показати імпульси керування при викривленні гармонік, ми виконаємо наступні кроки:

Кроки для реалізації:

1. Генерація базового сигналу ШІМ:
   - Трикутна хвиля як опорний сигнал.
   - Синусоїдальний сигнал як модулюючий.
2. Додавання гармонік до модулюючого сигналу:
   - Генерація викривлень за рахунок додавання гармонік.
3. Реалізація адаптивного фільтра:
   - Використання LMS-алгоритму для компенсації гармонійних спотворень у модулюючому сигналі.
4. Формування імпульсів керування:
   - Порівняння модулюючого сигналу (з викривленням і після фільтрації) з трикутною хвилею.

```
% Параметри моделі
f_base = 50;          % Основна частота, Гц
f_pwm = 2000;         % Частота ШІМ, Гц
V_base = 1;           % Амплітуда модулюючого сигналу
T_base = 1 / f_base;  % Період модулюючого сигналу
T_pwm = 1 / f_pwm;    % Період ШІМ

t = 0:T_pwm:2*T_base; % Час моделювання (два періоди основної частоти)

% Генерація модулюючого сигналу (синусоїда)
V_mod = V_base * sin(2 * pi * f_base * t);

% Додавання гармонік до модулюючого сигналу
harmonics = [
    3, 0.1;  % Гармоніка 3-го порядку з амплітудою 10% від основної
    5, 0.05; % Гармоніка 5-го порядку з амплітудою 5% від основної
];
```

```
V_harmonics = zeros(size(t));
for i = 1:size(harmonics, 1)
    n = harmonics(i, 1); % Порядок гармоніки
    amp = harmonics(i, 2); % Амплітуда гармоніки
    V_harmonics = V_harmonics + amp * sin(2 * pi * n * f_base * t);
end

V_mod_distorted = V_mod + V_harmonics; % Викривлений модулюючий сигнал

% Опорний сигнал (трикутна хвиля)
V_carrier = 1.2 * sawtooth(2 * pi * f_pwm * t, 0.5);

% Формування імпульсів керування (звичайний ШІМ)
PWM_signal_normal = V_mod_distorted > V_carrier;

% Адаптивний фільтр (LMS)
mu = 0.01;  % Коефіцієнт навчання
W = zeros(size(t));  % Коефіцієнти фільтра
V_mod_filtered = zeros(size(t)); % Фільтрований сигнал

for k = 2:length(t)
    x_k = V_mod_distorted(k); % Вхідний сигнал
    V_mod_filtered(k) = W(k-1) * x_k; % Вихід фільтра
    error = V_mod(k) - V_mod_filtered(k); % Помилка
    W(k) = W(k-1) + mu * error * x_k; % Оновлення коефіцієнтів
end

% Формування імпульсів керування (ШІМ з адаптивним фільтром)
PWM_signal_adaptive = V_mod_filtered > V_carrier;

% Побудова графіків
figure;

% Модулюючий сигнал (викривлений)
subplot(4, 1, 1);
plot(t, V_mod, 'b', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(t, V_mod_distorted, 'r--', 'LineWidth', 1);
title('Модулюючий сигнал (викривлений)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Амплітуда');
legend('Ідеальний', 'Викривлений');
grid on;

% Вихід адаптивного фільтра
```

```
subplot(4, 1, 2);
plot(t, V_mod_distorted, 'r--', 'LineWidth', 1);
hold on;
plot(t, V_mod_filtered, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Вихід адаптивного фільтра');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Амплітуда');
legend('Викривлений', 'Фільтрований');
grid on;
% Імпульси ШІМ (звичайний)
subplot(4, 1, 3);
plot(t, PWM_signal_normal, 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('Імпульси ШІМ (звичайний)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('ШІМ');
grid on;
% Імпульси ШІМ (з адаптивним фільтром)
subplot(4, 1, 4);
plot(t, PWM_signal_adaptive, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Імпульси ШІМ (з адаптивним фільтром)');
xlabel('Час (с)');
ylabel('ШІМ');
grid on;
```

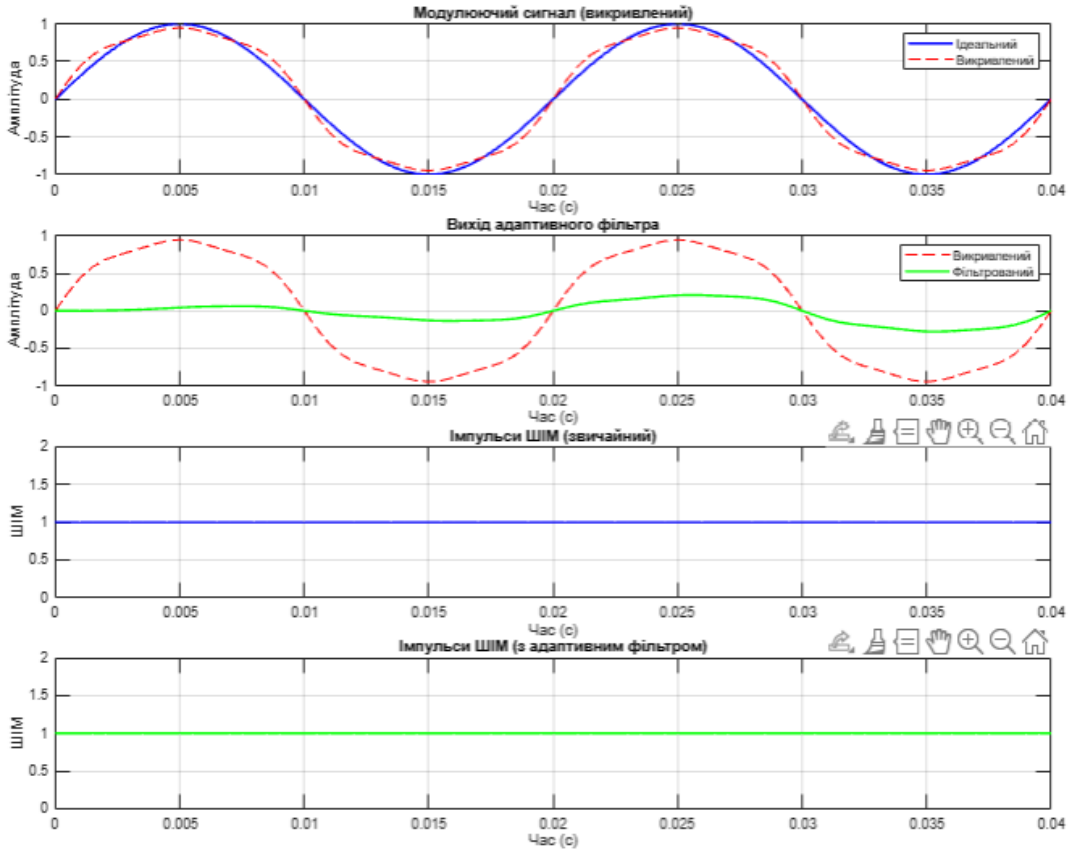


Рисунок 2.10. Порівняння звичайного ШІМ-алгоритму з алгоритмом, який використовує адаптивний фільтр

Вибір фільтрів:

- Використовувати активні фільтри для компенсації гармонік у системах зі стабільними умовами.
- Застосовувати адаптивні фільтри для систем із динамічно змінним навантаженням.

Оптимізація параметрів електроприводів:

- Використовувати частотні перетворювачі з оптимізованими алгоритмами ШІМ для зниження гармонік.
- Застосовувати LC-фільтри з розрахованими параметрами для мінімізації втрат енергії.

Моніторинг та діагностика:

- Встановити системи постійного моніторингу якості електроенергії.
- Використовувати аналізатор гармонік для виявлення викривлень у реальному часі.

Підвищення енергоефективності:

- Інтегрувати алгоритми енергозбереження в системи управління електроприводом.
- Використовувати обладнання з високим ККД.

Оцінка економічного ефекту оптимізації

1. Зменшення витрат на енергію:

   Зниження гармонік і втрат в мережі скорочує енергоспоживання до 5-15%.

   При споживанні 100 МВт·год на рік це може заощадити від 5 до 15 МВт·год (~1500-4500 євро на рік при тарифі 0.3 євро/кВт·год).

2. Покращення надійності обладнання:

Скорочення гармонійних навантажень зменшує зношення трансформаторів, двигунів і кабелів, що знижує витрати на ремонт до 10-20% на рік.

Зменшення штрафів за низьку якість енергії:

У промислових мережах штрафи за гармоніки можуть досягати 2-5% від річного енергоспоживання. Оптимізація усуває ці витрати.

Повернення інвестицій :

Інвестиції в активні/адаптивні фільтри окуповуються за 2-4 роки завдяки зниженню енергоспоживання та зменшенню експлуатаційних витрат.

Висновки до розділу 2.

Впровадження адаптивних та активних фільтрів у структуру електроприводу значно покращує якість електроенергії. Ці фільтри ефективно знижують гармонійні спотворення, забезпечуючи синусоїдальну форму струму та напруги в системі. Це сприяє зниженню втрат у мережевих елементах, таких як двигуни, кабелі та трансформатори, підвищуючи їх надійність і довговічність.

Зменшення гармонійних втрат дозволяє скоротити енергоспоживання на 5–15%, що забезпечує значну економію в промислових системах. Активні фільтри демонструють високу ефективність за умов стабільного навантаження, але їх ефективність знижується при появі нових частот гармонік. У таких випадках адаптивні фільтри показують кращі результати завдяки здатності підлаштовуватися до змін у реальному часі, використовуючи алгоритми, такі як LMS. Це дозволяє мінімізувати помилки та стабілізувати систему навіть у динамічних умовах.

Порівняння звичайного ШІМ із ШІМ, оснащеним адаптивним фільтром, показує, що останній забезпечує точніші вихідні сигнали. Форма імпульсів після адаптивного фільтра стає ближчою до ідеальної навіть за

наявності значних гармонійних спотворень. Водночас активний фільтр є простішим у реалізації та підходить для систем із передбачуваними умовами роботи.

Економічна ефективність впровадження фільтрів проявляється у зменшенні витрат на енергоспоживання, обслуговування обладнання та уникненні штрафів за низьку якість електроенергії. Інвестиції окуповуються за 2–4 роки, забезпечуючи довготривалу вигоду.

Активні фільтри рекомендовано для застосування в системах зі стабільним навантаженням, тоді як адаптивні фільтри підходять для динамічних умов роботи, де характер навантаження часто змінюється. Інтеграція ШІМ із адаптивними фільтрами у частотні перетворювачі дозволяє оптимізувати управління IGBT-модулями, підвищуючи загальну ефективність системи.

Таким чином, адаптивні та активні фільтри є важливими технологіями, що забезпечують підвищення якості електроенергії, зменшення витрат і підвищення надійності промислових електроприводів. Їх впровадження є технічно та економічно доцільним у сучасних умовах.

Список використаних джерел

1. Адаптивний регулятор у структурі сучасного комплектного електроприводу. Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2014. URL: https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1417/1/n78v2r2014shareyko.pdf (дата звернення: 14.12.2024).
2. Порівняльний аналіз пасивних, активних та гібридних фільтрів гармонік. DOAJ. URL: https://doaj.org/article/5938440a978e4a719c17c5905ca350a0 (дата звернення: 14.12.2024).
3. Пояснювальна записка. Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/53452/1/Alokhin_bakalavr.pdf (дата звернення: 14.12.2024).
4. Порівняльний аналіз ефективності пасивного та активного фільтрів вищих гармонік. Вісник Приазовського державного технічного університету, 2023. URL: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310686 (дата звернення: 14.12.2024).
5. Вступ до активних фільтрів. LibreTexts - Ukrayinska, 2021. URL: https://ukrayinska.libretexts.org (дата звернення: 14.12.2024).
6. Активні фільтри. LibreTexts - Ukrayinska, 2021. URL: https://ukrayinska.libretexts.org (дата звернення: 14.12.2024).
7. Вибір фільтрових реакторів для промислових електричних мереж. Науковий вісник НУ «Львівська політехніка», 2022. URL: https://science.lpnu.ua (дата звернення: 14.12.2024).
8. Однофазний гібридний фільтр на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2019. URL:

https://prc.ied.org.ua/index.php/proceedings/article/view/93 (дата звернення: 14.12.2024).

9. Активні фільтри. Вінницький національний технічний університет. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/26799/7748.pdf (дата звернення: 14.12.2024).
10. Адаптивне керування силовими активними фільтрами. Кафедра АЕМС-ЕП, НТУУ «КПІ». URL: https://epa.kpi.ua/science/postgraduate/zaichenko/ (дата звернення: 14.12.2024).
11. Показники якості електроенергії та їхнє поліпшення активними фільтрами. Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2022. URL: https://prc.ied.org.ua/index.php/proceedings/article/view/287 (дата звернення: 14.12.2024).
12. Адаптивний фільтр. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адаптивний_фільтр (дата звернення: 14.12.2024).
13. Система прямого керування струмом активного фільтра. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2019. URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2609 (дата звернення: 14.12.2024).
14. Способи вдосконалення активних фільтрів. Київський національний університет технологій та дизайну. URL: https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/9713/1/MSIE2018_P104.pdf (дата звернення: 14.12.2024).
15. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. John Wiley & Sons, 2017. 379 p.
16. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 960–971.

17. Bhattacharya S., Divan D., Banerjee B. Synchronous frame harmonic isolator using active series filter. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(5): 1015–1022.
18. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. John Wiley & Sons, 2017. 453 p.
19. Phipps J.K. A transfer function approach to harmonic filter design. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(2): 297–305.
20. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S. Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281–1291.
21. Luo F.L., Ye H. Power Electronics: Advanced Conversion Technologies. CRC Press, 2010. 698 p.
22. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons, 2003. 824 p.
23. Peng F.Z. Application issues of active power filters. IEEE Industry Applications Magazine, 1999, 4(5): 21–30.
24. Grady W.M., Samotyj M.J., Noyola A.H. Survey of active power line conditioning methodologies. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1536–1542.
25. Akagi H. New trends in active filters for power conditioning. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312–1322.
26. Busquets-Monge S., Alepuz S., Bordonau J. Pulse width modulations for three-level converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 800–807.
27. Lipo T.A. Introduction to AC Machine Design. Wiley-IEEE Press, 2004. 630 p.
28. Rashid M.H. Power Electronics Handbook. Butterworth-Heinemann, 2010. 1400 p.
29. Zanchetta P., Watson A.J., Wheeler P.W. Control design for power electronics. Springer, 2008. 398 p.

30. Carrasco J.M., Franquelo L.G., Bialasiewicz J.T. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002–1016.
31. Moran L., Dixon J.W., Wallace R.R. A three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(4): 402–408.
32. Hassaine L., Tlemcani M., Azoui B. Adaptive active power filter using real-time controller. Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, 2008: 25–30.
33. Bollen M.H. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press, 2000. 512 p.
34. Holtz J., Quan D. Drift and parameter compensating current control for PWM inverters based on real-time adaptive estimation. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(4): 589–599.
35. Singh G.K., Sharma K. Active filters for power quality improvement: A comprehensive review. Electric Power Components and Systems, 2006, 34(8): 767–785.
36. Chandra A., Singh B. A review on current harmonic compensation using active filters. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(6): 32–40.
37. Saadate S., Grinberg Y., Al-Haddad K. Design and control of shunt active power filters for improved power quality. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2003, 150(2): 97–103.
38. Langlois D. Adaptive control of active harmonic filters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 19(2): 327–336.
39. Akagi H. Control strategy and design of shunt active power filters. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(3): 431–437.
40. Bollen M.H., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. Wiley-IEEE Press, 2011. 522 p.

41. El-Hefnawi M., Saied H., Abdel-Maksoud M. Optimization of active power filter parameters using artificial intelligence techniques. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 92–101.
42. Phipps J.K., Nelson J.P., Sen P.C. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(2): 476–484.
43. Tang Y., Loh P.C., Blaabjerg F. Dynamic performance and control of power electronics. IET Power Electronics, 2008, 1(1): 35–42.
44. Kolhe M.L., Joshi R.G., Mahajan A. A study of hybrid filters for harmonic compensation in power systems. Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, 2011: 350–357.
45. Aredes M., Heumann K., Watanabe E.H. An universal active power line conditioner. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 545–551.
46. Wu T.F., Shen Y.K., Wang H.C. A comparison of three-phase active power filters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(3): 303–308.
47. Rodriguez J., Jih-Sheng L., Fang Z. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724–738.
48. Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Springer, 2002. 520 p.
49. Jang D., Kim G., Kim K. Adaptive notch filter for real-time harmonic detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(3): 367–372.
50. Montague T., Stevens D., Olson R. Development of DSP-based active filters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1563–1570.