

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Зайченко Юрій Михайлович



УДК 621.314.5

**АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ
СИЛОВИМИ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ
З ВЛАСТИВІСТЮ СЕЛЕКТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Пересада Сергій Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, Міністерство освіти і науки України,
директор Навчально-наукового інституту електромеханіки,
енергозбереження і систем управління;

кандидат технічних наук
Чопик Василь Васильович,
Інститут електродинаміки НАН України, старший науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів.

Захист відбудеться “06” жовтня 2020 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 701.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» вересня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. І. Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перетворення параметрів електричної енергії здійснюється за допомогою напівпровідникових перетворювачів, які являють собою нелінійне навантаження для електричної мережі. Типовими прикладами таких навантажень є регульовані електроприводи постійного та змінного струмів, сучасні освітлювальні системи, блоки живлення промислового, побутового та офісного обладнання. Вони споживають з електричної мережі несинусоїдний струм, що призводить до додаткових втрат потужності в мережах, хибного спрацювання захисної та комутаційної апаратури, прискореного старіння електротехнічних приладів та ізоляції, відмови комп'ютерних систем, а також вимагає завищення встановленої потужності обладнання.

Традиційні пасивні фільтри, що застосовуються для компенсації гармонічних спотворень мають ряд недоліків, що обмежують їх застосування в електричних мережах з сучасними напівпровідниковими навантаженнями. Починаючи з 1990-их було розроблено засоби активної фільтрації – силові активні фільтри (САФ), які забезпечують компенсацію гармонічних спотворень і реактивної складової струму мережі. Представлено різноманітні структури САФ та розроблено методи керування ними. Значний внесок у розвиток методів керування силовими активними фільтрами зроблено вітчизняними та закордонними науковцями: І. В. Жежеленком, А. К. Шидловським, В. М. Михальським, Н. Akagi, A. Tilli, J. Arrillaga, V. Singh, E. Lavora та іншими.

Одним із перспективних напрямів керування САФ є використання селективної компенсації гармонік, яка передбачає компенсацію найбільш критичних гармонічних складових струму навантаження. Завдяки цьому суттєво зменшуються вимоги до обчислювальної потужності керуючого контролера і встановленої потужності силової електроніки. Методи керування селективною компенсацією гармонік струмів на сьогодні знаходиться в стадії розвитку, що обумовлено як складністю задачі керування, так і недостатнім розвитком загальної теорії селективного оцінювання гармонічних складових і їх подальшого відпрацювання в умовах параметричної невизначеності вихідного кола САФ.

Саме тому актуальною науковою задачею є розробка нових методів керування силовими активними фільтрами, які забезпечують селективне оцінювання і подальшу компенсацію вищих гармонік струму, мають властивості адаптації до зміни параметрів вихідного кола САФ, а також є простими з точки зору їх практичної реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2014–2018 років, відповідно до наукового напрямку кафедри «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та держбюджетної теми №2841-ф «Методи робастного адаптивного керування електромеханічними системами з підвищеними динамічними та енергетичними показниками» (№ ДР 0115U000381), де автор був співвиконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення швидкодії та властивостей селективності силових активних фільтрів за рахунок розро-

блення та впровадження методів адаптивного керування, оцінювання гармонічного складу струму та ідентифікації параметрів силової частини.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались такі основні задачі.

1. Формулювання задачі дослідження і обґрунтування необхідності її вирішення на основі огляду існуючих методів керування силовими активними фільтрами.
2. Розробка методу формування матриці зворотніх зв'язків спостерігача гармонік струму мережі, для забезпечення властивості селективності та підвищеної швидкодії оцінювання.
3. Розробка методу підвищення завадостійкості спостерігачів гармонік, який забезпечує відсутність фазових і амплітудних похибок оцінювання.
4. Розробка методу керування напругою ланки постійного струму САФ для асимптотичного регулювання її усередненого значення.
5. Розробка методу керування струмами активного фільтра, та синтез на його основі алгоритмів, що гарантують одночасне відпрацювання заданих струмів, оцінку вищих гармонік та активного опору і індуктивності вихідного дроселя фільтра.
6. Створення комп'ютерних математичних моделей синтезованих систем керування та дослідження їх властивостей методом математичного моделювання. Розробка програмних засобів для практичної реалізації, експериментальні дослідження динамічних характеристик розроблених систем.

Об'єктом дослідження є процеси оцінювання та компенсації гармонічних спотворень струмів в трифазній мережі.

Предметом дослідження є методи керування САФ з селективною компенсацією вищих гармонік струму та реактивної потужності.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи сучасної нелінійної теорії керування, такі як: другий метод Ляпунова, лінеаризація зворотним зв'язком, теорія адаптивного керування, а також методи фізичного та математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації вперше одержано такі нові наукові результати:

1. Розвинуто теорію спостерігачів резонансного типу шляхом розробки нового методу формування матриці зворотніх зв'язків спостерігача гармонік струму мережі, який базується на специфікації резонансних властивостей його амплітудно-частотних характеристик відносно номеру оцінюваної гармоніки, в результаті чого полюси спостерігача, на відміну від існуючих методів, мають еквідистентне розташування відносно уявної осі комплексної площини, що забезпечує селективність оцінювання критичних гармонік струму з заданою точністю, а також підвищену (однакову для всіх гармонік) швидкодію оцінювання.
2. Розроблено метод підвищення завадостійкості спостерігачів гармонік за рахунок адаптивного оцінювання фільтрованих сигналів струмів навантаження, що забезпечує, на відміну від існуючих методів, відсутність фазових і амплітудних похибок оцінювання.
3. Вперше розроблено метод керування струмами активного фільтра, на основі якого синтезовано адаптивні алгоритми відпрацювання струмів, що гарантують одночасне відпрацювання заданих струмів, оцінку вищих гармонік, а також активного опору і індуктивності вихідного дроселя, завдяки чому підвищується точ-

ність відпрацювання струмів і спрощується структура САФ.

4. Розроблено новий метод керування напругою ланки постійного струму САФ, який, за рахунок синтезу нелінійного динамічного регулятора напруги забезпечує часткову лінеаризацію підсистеми напруги відносно її усереднених значень, завдяки чому вперше забезпечується розв'язка процесів керування струмами і напругою, асимптотичне регулювання усереднених значень напруги ланки постійного струму, а також асимптотичне відпрацювання струмів компенсації.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розвитку теоретичної бази для розробки і проектування систем керування САФ, а також в розробці технічних та програмних засобів для їх дослідження і практичної реалізації. При виконанні дисертаційної роботи отримано наступні практичні результати:

1. Розроблені в роботі методи адаптивного керування САФ дозволяють значно спростити технічну реалізацію системи керування за рахунок: а) зниження порядку спостерігача і усунення його «слабо» демпфованих полюсів; б) підвищення завадозахищеності підсистем оцінювання і відпрацювання струмів, оскільки не вимагають «великих» значень коефіцієнтів підсилення; в) фізичної обґрунтованості і простоти налаштування.

2. Алгоритми адаптивного керування струмами САФ не вимагають інформації про параметри силового кола САФ і тому можуть використовуватися для реалізації процедур самоналаштування.

3. Створений пакет моделюючих програм, а також розроблене програмне забезпечення для керуючих контролерів дозволяють виконувати повномасштабні дослідження та практичну реалізацію запропонованих алгоритмів керування САФ.

4. Застосування розроблених алгоритмів керування, що є простішими в технічній реалізації, дозволяє досягти значної економії при виробництві САФ. Результати роботи впроваджено: в силових активних фільтрах виробництва ТОВ «Техносервіспривод», м. Київ, та в освітній процес в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Робастне та адаптивне керування в електромеханічних системах», «Енергоефективність електромеханічних систем», «Цифрова обробка сигналів в електромеханічних системах».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено авторський підхід до розробки методів адаптивного керування, оцінювання гармонічного складу струму та ідентифікації параметрів силової частини активного фільтра. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: в [1], [3] – розробка алгоритму оцінювання вищих гармонік струму; в [2], [10] – дослідження властивостей селективності та динамічних властивостей спостерігачів при різних способах формування матриці налаштування; в [4] – дослідження динамічних властивостей алгоритму керування струмами САФ; в [5] – дослідження властивостей спостерігачів при стандартному налаштуванні; в [6] – дослідження розроблених структур керування методом математичного моделювання; в [7], [8] – доведення властивості стійкості адаптивних спостерігачів невідомих параметрів САФ; в [9] – розробка методу керування напругою ланки постійного струму.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати

і висновки дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на міжнародних конференціях: «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2015, 2017 р.), IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Київ, 2017 р.), International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (м. Кременчук, 2017, 2019 р.), IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (м. Київ, в 2018 р.), Проблеми сучасної електротехніки (м. Київ, в 2018 р.), «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, в 2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 10 наукових публікаціях, у тому числі у 4 статтях у наукових фахових виданнях України (з них 1 – у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS) та у 6 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях (з них 5 – в працях конференцій IEEE, які індексуються в базі SCOPUS).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури із 150 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 196 сторінок, у тому числі 120 сторінок основного тексту, 48 рисунків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію результатів дисертаційних досліджень, надано дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі виконано аналіз існуючих підходів до вирішення проблеми компенсації гармонічних спотворень мережі з метою підвищення якості електричної енергії. Встановлено, що одним з найбільш перспективних підходів є використання паралельного активного фільтра, функціональну схему якого показано на рис. 1, де позначено: C – накопичувальний конденсатор, L – вихідні дроселі, які формують струми фільтра i_A, i_B, i_C шляхом прикладення заданих вихідних напруг інвертора, u_{mA}, u_{mB}, u_{mC} – фазні напруги мережі, i_{mA}, i_{mB}, i_{mC} – струми мережі, i_{LA}, i_{LB}, i_{LC} – струми навантаження.

На основі огляду методів керування САФ та оцінювання гармонік встановлено, що в існуючих САФ, для оцінювання гармонічного складу струму мережі, як правило, використовуються методи на основі швидкого перетворення Фур'є, методи на основі теорії миттєвої потужності, спостерігачі Люєнбергера.

Використання швидкого перетворення Фур'є вимагає високої обчислювальної здатності керуючого пристрою, а застосування теорії миттєвої потужності значно підвищує вимоги до силової частини активного фільтра, оскільки передбачає компенсацію усіх гармонік. Спостерігачі Люєнбергера забезпечують асимптотичне оцінювання гармонічного складу струму, але проблема досягнення властивостей селективної компенсації гармонік зі збереженням динамічних властивостей до цього часу не є вирішеною.

На основі аналізу результатів досліджень гармонічного складу струму в реальних мережах обґрунтовано, що завдяки селективній компенсації можливо значно

спростити технічну реалізацію активного фільтра і при цьому досягти прийнятнього рівня компенсації спотворень струму. З огляду існуючих систем керування встановлено, що висока швидкодія контурів регулювання струмів в них досягається за рахунок застосування регуляторів струму з «великим» підсиленням, що негативно впливає на їх завадостійкість. Також значний вплив на якість компенсації можуть здійснювати варіації активного опору та індуктивності силового кола САФ.

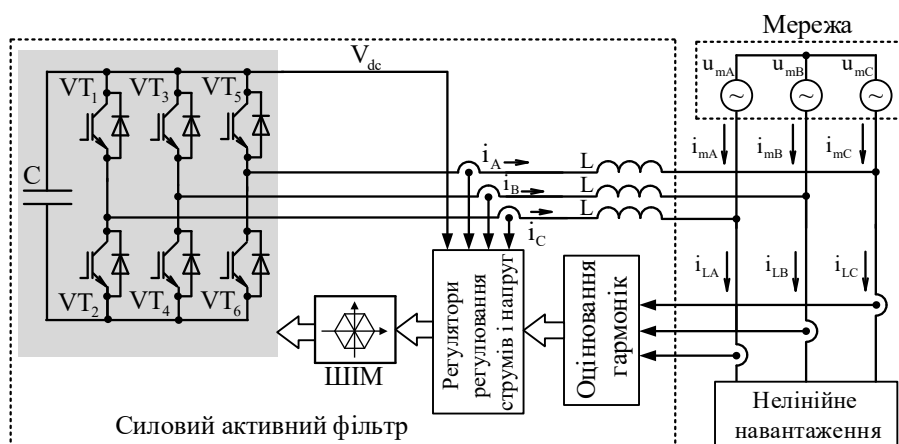


Рис.1. Функціональна схема САФ

дозволить підвищити швидкодію та властивості селективності САФ.

У другому розділі розвинуто метод синтезу та аналізу спостерігачів вищих гармонік загальної структури Люенбергера, використання якого забезпечує асимптотичність оцінювання гармонік з властивістю селективності і підвищеною швидкодією. Представлено результати дослідження динамічних властивостей спостерігача та властивостей селективності методом математичного моделювання.

Спостерігач гармонічного складу струму, відомий як спостерігач А. Tilli, побудовано на основі наступного розгляду. Трифазний сигнал розкладено на пряму (p) та зворотну (n) послідовності згідно з теоремою Фортеск'є, здійснено перехід до нерухомої двофазної системи координат (a-b) з подальшим перетворенням в систему координат (d-q), яка орієнтована за вектором напруги трифазної мережі. В системі координат (d-q) пряма та зворотна послідовності записуються у вигляді

$$\begin{aligned} i_d^p &= I_p \cos((n-1)\omega_m t), & i_d^n &= I_n \cos((n+1)\omega_m t), \\ i_q^p &= I_p \sin((n-1)\omega_m t), & i_q^n &= I_n \sin((n+1)\omega_m t), \end{aligned} \quad (1)$$

де I_p, I_n – амплітуди прямої та зворотної послідовностей, ω_m – кутова частота основної гармоніки напруги мережі, n – порядок гармоніки. При переході від нерухомої системи координат (a-b) в систему координат (d-q), має місце зміщення частот, тобто, гармоніка з частотою $n\omega_m$ (пряма послідовність) зсувається до частоти $(n-1)\omega_m$, а гармоніка з частотою $-n\omega_m$ зсувається до частоти $(n+1)\omega_m$. Основна гармоніка ($n=1$) при переході в обертову систему координат буде являти собою сигнали постійного струму, пропорційні активному та реактивному струмам.

Відповідно до концепції внутрішньої моделі (англ. Internal Model Approach), сигнали (1) розглядаються як такі, що генеруються динамічними системами у вигляді послідовності автономних осциляторів виду

Таким чином показано, що вирішення задач з розробки методів налаштування спостерігачів гармонік, адаптивного керування струмами компенсації, оцінювання гармонічного складу струму та ідентифікації параметрів силової частини є актуальним і

$$\dot{\mathbf{x}}_h(t) = \mathbf{A}_h \mathbf{x}_h(t), \quad (2)$$

де $\mathbf{x}_h = (x_{dph}, x_{qph}, x_{dnh}, x_{qnh})^T$, $\mathbf{A}_h = \text{blockdiag}[\mathbf{A}_p^h, \mathbf{A}_n^h]$, $\mathbf{A}_p^h = h\omega_m \mathbf{J}$, $\mathbf{A}_n^h = -h\omega_m \mathbf{J}$, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$,

h – номер гармоніки в системі координат (d-q), індекси p і n відносяться відповідно до прямої та зворотної послідовності.

Спостерігач із властивостями селективності. Для оцінювання N гармонік, які генеруються осциляторами у вигляді (2), стандартним є рішення у вигляді спостерігача Люєнбергера в наступній загальній формі:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{K}[\mathbf{i}_L - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}], \quad (3)$$

де $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\mathbf{x}}_1^T, \hat{\mathbf{x}}_2^T, \dots, \hat{\mathbf{x}}_N^T)^T$ – вектор стану спостерігача, в якому

$$\hat{\mathbf{x}}_h = (\hat{x}_{dph} \ \hat{x}_{qph} \ \hat{x}_{dnh} \ \hat{x}_{qnh})^T, \quad \mathbf{A} = \text{blockdiag}[\mathbf{A}_h], \quad \mathbf{K} = \text{col}[\mathbf{K}_h], \quad \mathbf{K}_h = \begin{pmatrix} -k_{1h}\mathbf{I} + \mathbf{J}k_{2h} \\ -k_{1h}\mathbf{I} - \mathbf{J}k_{2h} \end{pmatrix},$$

$\mathbf{C}[2, 4N] = [\mathbf{I}, \mathbf{I}, \dots, \mathbf{I}]$, $\mathbf{I} = \text{diag}[1, 1]$, $k_{1h}, k_{2h}, \dots, k_{1N}, k_{2N}$ – коефіцієнти матриці зворотних зв'язків спостерігача, $h = 1, 2, \dots, N$, $\mathbf{i}_L = (i_{Ld}, i_{Lq})^T$ – вектор струму навантаження.

Оцінений вектор струму $\hat{\mathbf{i}}_L = (\hat{i}_{Ld}, \hat{i}_{Lq})^T$ розраховується відповідно до виразів

$$\hat{i}_{Ld} = \hat{x}_{d0} + \sum_{h=1}^N (\hat{x}_{dph} + \hat{x}_{dnh}), \quad \hat{i}_{Lq} = \hat{x}_{q0} + \sum_{h=1}^N (\hat{x}_{qph} + \hat{x}_{qnh}), \quad (4)$$

в яких оцінені значення активної \hat{x}_{d0} та реактивної \hat{x}_{q0} компонент визначаються окремо, як буде показано далі.

Головним етапом синтезу спостерігачів є конструювання матриці зворотних зв'язків \mathbf{K} . Стандартне налаштування спостерігача (3) передбачає забезпечення власної частоти недемпфованих коливань $\omega_n = (1 - 2\delta^2)^{-1/2} h\omega_m$, $k_1 = \delta\omega_n$, $k_2 = \omega_n^2 - (h\omega_m)^2 / 2h\omega_m$ при однаковому коефіцієнті демпфування δ для всіх N гармонік. Ідея такого налаштування полягає в тому, що при забезпеченні цих умов спостерігач гармонік набуває резонансних властивостей таких, що для сигналів з частотою $h\omega_m$ коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, а для інших частот наближається до нуля. Значення δ визначає динамічні властивості спостерігача і його селективність. В умовах оцінювання усіх N гармонік значення δ обирається виходячи з бажаної швидкодії спостерігача, оскільки гармоніки оцінюються асимптотично. Для забезпечення селективної компенсації з оціненого ряду гармонік обираються ті, які підлягають компенсації. В той же час для зниження порядку спостерігача бажано оцінювати тільки гармоніки, які компенсуються, що вимагає розгляду властивостей селективності спостерігача. Пошук компромісу між швидкістю та селективністю оцінювання неможливо розв'язати аналітичними методами, наприклад, оптимізації лінійних систем, через високий порядок спостерігача (200 – для оцінки 50 гармонік) та специфіки оцінювання гармонік в резонансному режимі. Тому запропоновано новий метод конструювання матриці зворотних зв'язків \mathbf{K} , який базується на розгляді частотних характеристик спостерігача. Для стандартного налаштування виконано дослідження залежності динаміки

та селективності спостерігача від значення δ . Для цього розглянуто гармонічний склад струму, який складається з суми вищих гармонік одиничної амплітуди та фазовим зсувом $\pi / (h + 1)$ з порядком від 1-го до 21-го в системі координат (d-q).

Встановлено, що при більших значеннях коефіцієнта демпфування швидкість сходимості похибок оцінювання струмів є вищою. В той же час, збільшення δ призводить до деградації властивостей селективності, оскільки резонансні зони для кожної гармоніки на АЧХ розширюються. В роботі також розглянуто та досліджено дискретну версію спостерігача (3).

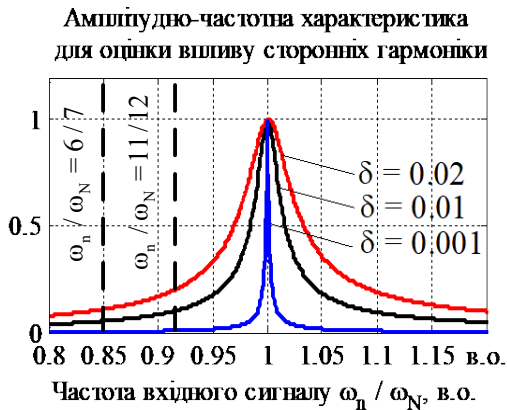


Рис. 2. АЧХ спостерігача

Чутливість спостерігача гармоніки з частотою ω_N до наявності сторонніх гармонік у спектрі (які не мають оцінюватись) демонструється на АЧХ спостерігача, яку представлено у відносних одиницях на рис. 2.

З рис. 2 слідує, що зі збільшенням коефіцієнта δ значно розширюється полоса резонансу, що в результаті може призводити до хибного оцінювання гармонічного складу. Можливе налаштування з δ , виходячи з найвищої частоти оцінювання, призводить до наявності «слабо» демпфованих полюсів спостерігача для «малих» значень коефіцієнтів демпфування, які вимагаються для забезпечення необхідного рівня селективності.

В системах з наперед відомими важливими для компенсації частотами гармонічних складових такий метод налаштування спостерігача не є раціональним, оскільки ускладнює їх цифрову реалізацію.

Підтвердженням актуальності визначення налаштувань з властивістю селективності є той факт, що, як показано в багатьох дослідженнях, трифазні споживачі електроенергії, побудовані на основі 6-пульсних схем (найбільш розповсюджені споживачі електроенергії), є джерелами так званих канонічних гармонік з порядком 5, 7, 11, 13, 17 та 19. Тобто в симетричних трипровідних трифазних мережах наявність парних гармонік та гармонік, кратних трьом, є нехтувано малою. За таких припущень селективне виявлення і подальша компенсація дозволяє забезпечити відповідність якості електричної енергії вимогам регулюючих документів.

В роботі показано, що, завдяки визначеній належності канонічних гармонік до прямої і зворотної послідовностей, можливо використовувати спостерігачі 6-ої, 12-ої та 18-ої гармонік в системі координат (d-q) для оцінювання одночасно 5-ої і 7-ої, 11-ої і 13-ої та 17-ої і 19-ої гармонік в системі координат (a-b). Ціль налаштування спостерігача полягає у знаходженні максимально допустимого коефіцієнта демпфування δ спостерігача гармоніки з порядком k , який забезпечить оцінювання гармонік із заданою точністю.

В роботі на основі розгляду частотних характеристик розраховано граничні значення коефіцієнтів демпфування за умов: а) присутні лише канонічні гармоніки; б) присутні усі гармоніки, окрім кратних трьом. Було прийнято, що коефіцієнт демпфування δ спостерігача гармоніки з порядком k вважається при-

йнятним в тому випадку, коли похибка оцінювання, яка обумовлена присутністю сусідніх гармонік не перевищує 5%. На основі отриманих коефіцієнтів демпфування формується матриця зворотних зв'язків спостерігача \mathbf{K} . Встановлено, що полюси спостерігачів гармонік при такому методі налаштування розташовуються приблизно на однаковій відстані r від уявної осі на комплексній площині ($r \approx 80$ та $r \approx 45$ для випадків а) та б)). Таке розташування полюсів гарантує, що оцінка кожної гармоніки затухає з однаковою швидкістю, в той час як значення коефіцієнта демпфування зменшується зі збільшенням порядку гармоніки.

З точки зору теорії спостерігачів розроблений метод показує, що розрахунок коефіцієнтів налаштування матриць зворотних зв'язків \mathbf{K}_h спостерігача (3) доцільно виконувати виходячи з еквідистентного розташування полюсів спостерігача на комплексній площині. Сформувавши задане розташування полюсів спостерігача у вигляді $\mathbf{P} = (-r - j\omega_{nh}, -r + j\omega_{nh}, -r + j\omega_{nh}, -r - j\omega_{nh})^T$ проводиться розрахунок коефіцієнтів k_1, k_2 матриць \mathbf{K}_h спостерігача (3) за допомогою програмних засобів автоматизованого проектування систем керування, на-

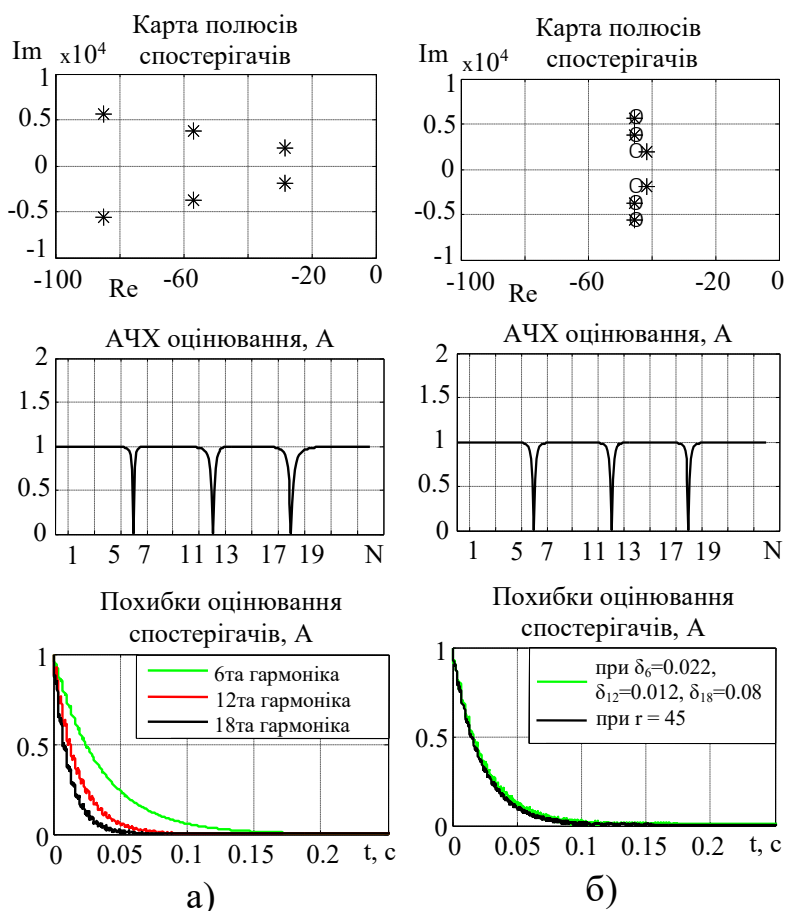


Рис. 3. Властивості спостерігачів: а) стандартне налаштування з $\delta = 0.015$; б) запропонований метод налаштування

позначено полюси спостерігача при заданих δ , а символом «o» - полюси спостерігача при $r = 45$.

Таким чином, результати цього дослідження формують концептуально новий ме-

приклад, в середовищі MatLab. Відмітимо, що кількість «слабо» демпфованих полюсів спостерігача за умови запропонованого налаштування зменшилася, що спрощує його програмну реалізацію.

Для порівняння на рис. 3 показано розташування полюсів, частотні характеристики і перехідні процеси похибок оцінювання гармонік для стандартного налаштування з $\delta = 0.015 = \text{const}$ (рис. 3а), а також відповідно до запропонованого методу для $\delta_6 = 0.022$, $\delta_{12} = 0.012$, $\delta_{18} = 0.08$ та для $r = 45$ (рис. 3б), при яких властивості робастності по відношенню до сусідніх гармонік є однаковими. На карті полюсів спостерігача на рис. 3б символом «*»

тод визначення матриці зворотних зв'язків спостерігача виходячи з еквідистентного розташування полюсів, що є внеском до теорії спостерігачів резонансного типу.

Оцінювання гармонік при фільтрованих вимірюваннях. Практична реалізація системи керування активним фільтром передбачає фільтрацію всіх сигналів, які надходять від аналогових давачів, для підвищення завадозахищеності. Фільтрація вимірних сигналів призводить до їхнього фазового зсуву, який буде різним для кожної гармоніки. Таким чином оцінювання гармонік на основі фільтрованих сигналів призводить до отримання хибної інформації про сигнал. Для вирішення цієї проблеми запропоновано новий метод підвищення завадостійкості спостерігачів гармонік за рахунок адаптивного оцінювання фільтрованих сигналів струму, який забезпечує відсутність фазових і амплітудних похибок оцінювання. Розглянемо відфільтровані сигнали похибок оцінювання струмів $\tilde{i}_{Ld} = i_{Ld} - \hat{i}_{Ld}$, $\tilde{i}_{Lq} = i_{Lq} - \hat{i}_{Lq}$ у системі координат (d-q):

$$\dot{y}_d = -\tau^{-1}y_d + \omega_m y_q + \tau^{-1}(i_{Ld} - \hat{i}_{Ld}),$$

$$\dot{y}_q = -\tau^{-1}y_q - \omega_m y_d + \tau^{-1}(i_{Lq} - \hat{i}_{Lq}).$$

Використовуючи фільтровані сигнали y_d , y_q на основі теорії адаптивного оцінювання синтезовано спостерігач гармонік у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{y} &= A_f y + (i_L - \Gamma^T \hat{x}), \\ \dot{\hat{x}} &= \lambda \Gamma P y + S \hat{x}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $y = (y_d, y_q)^T$, $\hat{x} = (\hat{x}_0^T, \hat{x}_1^T, \dots, \hat{x}_N^T)^T$, $\hat{x}_0 = (\hat{x}_{d0}, \hat{x}_{q0})^T$, $P=I$, $\Gamma^T = [I, C]$,

$S = \text{blockdiag}[0, A]$, $\lambda = \text{diag}(k_0, k_0, k_1^0, \dots, k_1^0) > 0$ - матриця коефіцієнтів налаштування.

Аналіз стійкості за Ляпуновим спостерігача (5) свідчить, що асимптотичність оцінювання гарантується для усіх $(k_0, k_1^0) > 0$. Спостерігач (5) оцінює як гармоніки струму, так і активну та реактивну складові x_{d0}, x_{q0} струму навантаження. Оптимізація лінійної системи (5) може здійснюватися будь-яким методом оптимізації лінійних систем. Спостерігач гарантує оцінювання усіх гармонік струму і відсутність фазових та амплітудних похибок оцінювання, проте не забезпечує властивостей селективності оцінювання.

У третьому розділі розроблено методи керування струмами САФ та усередненим значенням напруги ланки постійного струму. На першому кроці розглянуто відпрацювання заданих траєкторій струмів компенсації за умов припущення, що напруга ланки постійного струму достатня для їхнього формування. На другому кроці синтезовано алгоритм керування напругою, який забезпечує виконання цієї умови. Розглянуто два методи керування струмами САФ: з формуванням заданих струмів спостерігачем гармонік (3), а також на основі прямого вимірювання струмів навантаження з подальшим адаптивним оцінюванням вищих гармонік в процесі відпрацювання струмів.

Відповідно до рис. 1, баланс струмів у фазах в системі «мережа-навантаження-САФ» визначається як $i_m^{(d-q)} = i_L^{(d-q)} + i^{(d-q)}$, тому для компенсації гармонічних спо-

творень і реактивної потужності з метою забезпечення в струмі мережі $\mathbf{i}_m^{(d-q)}$ лише активної компоненти струму x_{d0} , струм компенсації САФ $\mathbf{i}^{(d-q)}$ має скомпенсувати реактивну складову x_{q0} та вищі гармоніки $\left(\sum_{h=1}^N x_{dph}, \sum_{h=1}^N x_{qph}, \sum_{h=1}^N x_{dnh}, \sum_{h=1}^N x_{qnh} \right)$.

Синтез алгоритмів відпрацювання струмів виконано для стандартної нелінійної математичної моделі силової частини САФ, у вигляді

$$\dot{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega_m \\ -\omega_m & -\alpha \end{bmatrix} \mathbf{i} - \frac{V_{dc}}{L} \mathbf{p}^* + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_m \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dot{V}_{dc} = 3\mathbf{p}^{*T} \mathbf{i} / 2C, \quad (6)$$

де $\mathbf{i} = (i_d, i_q)^T$ – струми фільтра, $\mathbf{p}^* = (p_d^*, p_q^*)^T$ – керуючі дії інвертора, U_m – амплітуда напруги мережі, V_{dc} – напруга ланки постійного струму, $\alpha = R/L$, R , L – опір і індуктивність дроселів.

Регулювання струмів САФ при селективній компенсації. Задача керування струмами САФ полягає в синтезі вектора керуючих дій \mathbf{p}^* , який гарантує компенсацію вищих гармонік та реактивної складової струму навантаження, для чого необхідно забезпечити умови

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_d = \sum_{h=1}^N x_{dph} + \sum_{h=1}^N x_{dnh}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} i_q = x_{q0} + \sum_{h=1}^N x_{qph} + \sum_{h=1}^N x_{qnh}, \quad (7)$$

звідки

$$i_d^* = \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dnh}, \quad i_q^* = \hat{x}_{q0} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qnh}. \quad (8)$$

Оскільки об'єкт керування (6) має повністю вимірюваний вектор стану, то це дозволяє використати теорію лінеаризуючого зворотнім зв'язком керування та сформуванню лінеаризуючий регулятор у вигляді

$$\mathbf{p}^* = \frac{1}{V_{dc}} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \omega_m L \\ -\omega_m L & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i} + \begin{pmatrix} U_m \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \right\}, \quad (9)$$

$$v_d = L(\alpha i_d^* + \dot{i}_d^* - k_{il} \tilde{i}_d + z_d), \quad v_q = L(\alpha i_q^* + \dot{i}_q^* - k_{il} \tilde{i}_q + z_q),$$

$$\dot{z}_d = -k_{ii} \tilde{i}_d, \quad \dot{z}_q = -k_{ii} \tilde{i}_q,$$

де $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$, $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ – похибки відпрацювання струмів, z_d, z_q – інтегральні складові регуляторів струму, k_{il}, k_{ii} – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

Оскільки спостерігач гармонік (3) не забезпечує оцінювання складових постійного струму x_{d0}, x_{q0} , то ці компоненти визначаються за допомогою фільтра низьких частот

$$\dot{\hat{x}}_{d0} = -\tau_f^{-1} \hat{x}_{d0} + \tau_f^{-1} i_{Ld}, \quad \dot{\hat{x}}_{q0} = -\tau_f^{-1} \hat{x}_{q0} + \tau_f^{-1} i_{Lq}, \quad (10)$$

в якому стала часу τ_f така, що складові вищих гармонік

$\sum_{h=1}^N x_{dph}, \sum_{h=1}^N x_{dnh}, \sum_{h=1}^N x_{qph}, \sum_{h=1}^N x_{qnh}$ після фільтрації можна вважати нехтувано малими.

Використання алгоритму керування (9)-(10) формує наступну динаміку похибок відпрацювання струмів САФ:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{i}}_d &= -k_i \tilde{i}_d + z_d, & \dot{\tilde{i}}_q &= -k_i \tilde{i}_q + z_q, \\ \dot{z}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d, & \dot{z}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q,\end{aligned}\quad (11)$$

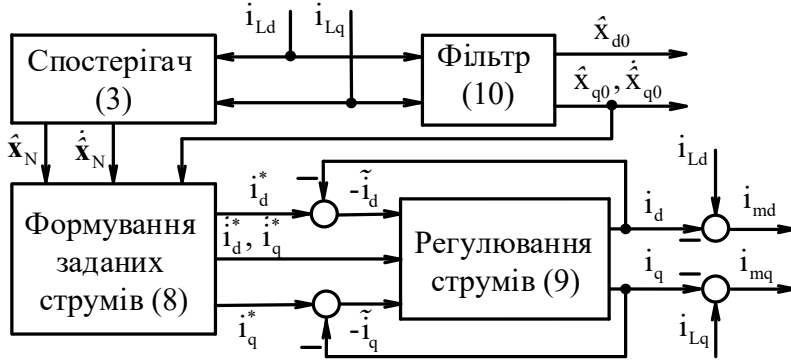


Рис. 4. Структурна схема системи відпрацювання струмів САФ

$\lim_{t \rightarrow \infty} i_{md} = \lim_{t \rightarrow \infty} (i_{Ld} - i_d) = x_{d0}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} i_{mq} = \lim_{t \rightarrow \infty} (i_{Lq} - i_q) = 0$, тобто цілі керування компенсацією вищих гармонік та реактивної потужності досягаються. Структурну схему системи відпрацювання струмів представлено на рис. 4.

Відпрацювання струмів з адаптивним оцінюванням вищих гармонік. Для САФ з компенсацією повного спектру гармонік струму в роботі розроблено новий метод адаптивного керування струмами з одночасним оцінюванням гармонічних складових. Структурну схему адаптивного керування струмами представлено на рис. 5.

Задані значення струмів для контурів регулювання сформовано у вигляді

$$i_d^* = i_{Ld} - \hat{x}_{d0}, \quad i_q^* = i_{Lq}. \quad (12)$$

З використанням другого методу Ляпунова синтезовано наступний лінеаризуючий зворотнім зв'язком регулятор струму

$$\begin{aligned}\mathbf{p}^* &= \frac{1}{V_{dc}} \left\{ \begin{pmatrix} U_m \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \right\}, \\ v_d &= L \left[-\omega_m i_q + \alpha \sum_{h=1}^N (\hat{x}_{dph} + \hat{x}_{dnh}) + \dot{\hat{x}}_{d0} + \sum_{h=1}^N \omega_h (\hat{x}_{qnh} - \hat{x}_{qph}) - k_{ii} \tilde{i}_d \right], \\ v_q &= L \left[\omega_m i_d + \alpha \left(\hat{x}_{q0} + \sum_{h=1}^N (\hat{x}_{qph} + \hat{x}_{qnh}) \right) + \sum_{h=1}^N \omega_h (\hat{x}_{dph} - \hat{x}_{dnh}) - k_{ii} \tilde{i}_q \right],\end{aligned}\quad (13)$$

в якому гармонічні складові, активна та реактивна складові оцінюються за допомогою алгоритму оцінювання на основі інформації про похибки відпрацювання струмів \tilde{i}_d , \tilde{i}_q . Алгоритм оцінювання співпадає з другим рівнянням в (5) при заміні

ні $\mathbf{y} = (\tilde{i}_d, \tilde{i}_q)^T$, $\mathbf{\Gamma} = (\mathbf{\Gamma}_0, \mathbf{\Gamma}_1, \dots, \mathbf{\Gamma}_N)^T$, $\mathbf{\Gamma}_0 = \text{diag}[-\alpha, -\alpha]$, $\mathbf{\Gamma}_h = [-\alpha \mathbf{I}, h\omega_m \mathbf{J}, -\alpha \mathbf{I}, -h\omega_m \mathbf{J}]$,

$\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}(\alpha^{-1}k_1, \alpha^{-1}k_1, \gamma_2, \gamma_2, \gamma_2, \gamma_2) > 0$ – матриця коефіцієнтів налаштування регулятора струмів.

Аналіз стійкості за Ляпуновим з використанням теореми про персистентність збудження свідчить, що адаптивний регулятор струмів (13) гарантує досягнення ці-

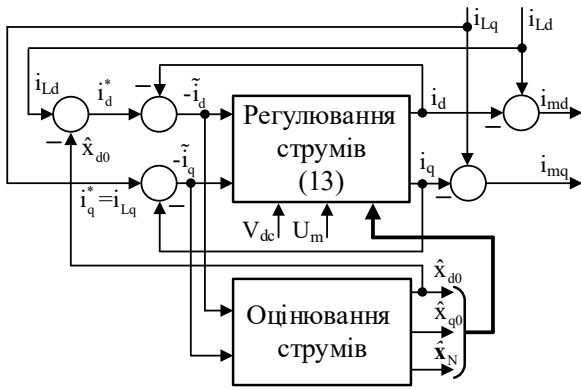


Рис. 5. Структурна схема системи керування струмами САФ з адаптивним оцінюванням гармонік

роблено новий метод керування напругою в ланці постійного струму на основі регулювання усередненої напруги, який не спотворює вихідний струм фільтра.

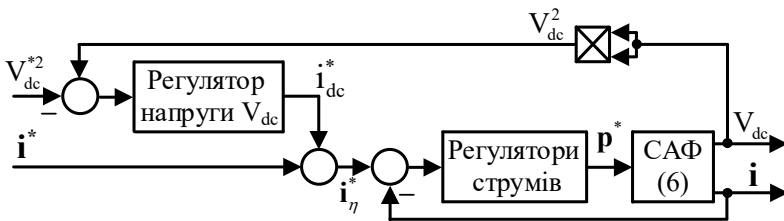


Рис. 6. Структурна схема системи регулювання струмів САФ та напруги ланки постійного струму

ну структуру, яку показано на рис. 6. Двовимірний регулятор струму забезпечує відпрацювання змінної i_{η}^* . Регулятор напруги формує додаткову до основної i^* складову i_{dc}^* , яка має стабілізувати напругу в ланці постійного струму. Відмітимо, що модифікуватися має лише активна складова струму, оскільки вона забезпечує компенсацію активних втрат в САФ.

Прийнявши до уваги (9), рівняння динаміки напруги в ланці постійного струму переписеться у вигляді

$$\dot{V}_{dc} = 3(i_d U_m - i_d v_d - i_q v_q) / 2C V_{dc}. \quad (14)$$

Визначимо похибку регулювання напруги як $\tilde{V}_{dc} = V_{dc}^2 - (V_{dc}^*)^2$, де $V_{dc}^* = \text{const}$ задане значення, та запишемо нові завдання для струмів САФ, які забезпечують регулювання струмів і стабілізацію напруги ланки постійного струму

$$i_{d\eta}^* = i_{dh}^* + i_{dc}^* = \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dnh} + i_{dc}^*, \quad i_{q\eta}^* = i_{qh}^* = \hat{x}_{q0} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qnh}. \quad (15)$$

Алгоритм відпрацювання струмів (9) при заміні i_d^* на $i_{d\eta}^*$, i_q^* на $i_{q\eta}^*$ і відомих похідних $\dot{i}_{d\eta}^*$, $\dot{i}_{q\eta}^*$ забезпечує асимптотичне відпрацювання струмів. За цієї умови рівняння динаміки похибки стабілізації напруги буде

лей асимптотичного керування струмами САФ та оцінювання вищих гармонік $\forall(k_1, \gamma_2) > 0$.

Регулювання напруги ланки постійного струму САФ. Компенсація гармонічних спотворень струму мережі передбачає, що напруга в ланці постійного струму підтримується на заданому рівні. Для стійкої роботи трифазних САФ необхідно підтримувати напругу в ланці постійного струму в діапазоні 600-900 В, при цьому є припустимою наявність коливань напруги, які не перевищують вказані межі. В роботі роз-

роблено новий метод керування напругою в ланці постійного струму на основі регулювання усередненої напруги, який не спотворює вихідний струм фільтра.

Специфіка керування струмами і напругою V_{dc} полягає в тому, що об'єкт керування (6) має менше керуючих дій, ніж регульованих виходів.

Для подолання цієї проблеми використано загаль-

ну структуру, яку показано на рис. 6. Двовимірний регулятор струму забезпечує відпрацювання змінної i_{η}^* . Регулятор напруги формує додаткову до основної i^* складову i_{dc}^* , яка має стабілізувати напругу в ланці постійного струму. Відмітимо, що модифікуватися має лише активна складова струму, оскільки вона забезпечує компенсацію активних втрат в САФ.

Прийнявши до уваги (9), рівняння динаміки напруги в ланці постійного струму переписеться у вигляді

$$\dot{V}_{dc} = 3(i_d U_m - i_d v_d - i_q v_q) / 2C V_{dc}. \quad (14)$$

Визначимо похибку регулювання напруги як $\tilde{V}_{dc} = V_{dc}^2 - (V_{dc}^*)^2$, де $V_{dc}^* = \text{const}$ задане значення, та запишемо нові завдання для струмів САФ, які забезпечують регулювання струмів і стабілізацію напруги ланки постійного струму

$$i_{d\eta}^* = i_{dh}^* + i_{dc}^* = \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{dnh} + i_{dc}^*, \quad i_{q\eta}^* = i_{qh}^* = \hat{x}_{q0} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qph} + \sum_{h=1}^N \hat{x}_{qnh}. \quad (15)$$

Алгоритм відпрацювання струмів (9) при заміні i_d^* на $i_{d\eta}^*$, i_q^* на $i_{q\eta}^*$ і відомих похідних $\dot{i}_{d\eta}^*$, $\dot{i}_{q\eta}^*$ забезпечує асимптотичне відпрацювання струмів. За цієї умови рівняння динаміки похибки стабілізації напруги буде

$$\dot{\tilde{V}}_{dc} = 3C^{-1} \left[(U_m - Ri_{dc}^*) i_{dc}^* - f_0(t) - f_1(i_{dc}^*) - f_n(t) \right], \quad (16)$$

де $f_0(t) = R(i_{dh}^{*2} + i_{qh}^{*2} + i_{q0}^{*2})$, $f_1(i_{dc}^*) = Li_{dc}^* i_{dc}^*$, $i_{q0}^* = \hat{x}_{q0}$,

$$f_n(t) = i_{dh}^* (U_m + 2Ri_{dc}^* + Li_{dc}^*) + 2Ri_{q0}^* i_{qh}^* + Li_{dh}^* (i_{dc}^* + i_{dh}^*) - Li_{qh}^* (i_{qh}^* + i_{q0}^*).$$

Складові правої частини (16) мають наступні важливі властивості: складова $f_n(t)$, яка пропорційна i_{dh}^* , i_{dh}^* , i_{qh}^* , i_{qh}^* , має нульове середнє значення за період, оскільки сигнали i_{dh}^* , i_{qh}^* є синусоїдними; складова $f_0(t)$, яка визначає витрати потужності в активних опорах, має ненульове усереднене постійне значення; компонента $Li_{dc}^* i_{dc}^* = \varepsilon \ll 1$ масштабується «малим» параметром L . В роботі показано, що вона має нехтувано малий вплив на динаміку похибки регулювання напруги.

Таким чином, ідея запропонованого методу керування напругою ланки постійного струму полягає в синтезі нелінійного динамічного регулятора, який забезпечує стабілізацію системи (16) і формує відому обмежену похідну i_{dc}^* , необхідну для відпрацювання струмів згідно (9).

Для часткової лінеаризації системи виконаємо нелінійне перетворення координат

$$\eta = (U_m - 2Ri_{dc}^*) i_{dc}^*, \quad (17)$$

з бажаною динамікою

$$\dot{\eta} = -\tau_{dc}^{-1} \eta - k_v \tau_{dc}^{-1} \tilde{V}_{dc} + \tau_{dc}^{-1} x_v, \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (18)$$

де $k_v > 0$, $k_{vi} > 0$ пропорційний та інтегральний коефіцієнт регулятора напруги, x_v – інтегральна складова регулятора, τ_{dc} – стала часу фільтра регулятора напруги, наявність якої забезпечує фільтрацію періодичних складових, які присутні в $f_0(t)$, $f_n(t)$.

Частково лінеаризована динаміка (16) при цьому набуває вигляду

$$\dot{\tilde{V}}_{dc} = \frac{3}{C} \left[\eta - \sum_{i=0}^2 f_i(t) \right], \quad \dot{\eta} = -\tau_{dc}^{-1} \eta - \tau_{dc}^{-1} k_v \tilde{V}_{dc} + \tau_{dc}^{-1} x_v, \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (19)$$

де $\sum_{i=0}^2 f_i(t)$ розглядається як збурення, ненульова складова якого компенсується дією інтегральної частини регулятора напруги.

Розв'язок (17), (18) відносно i_{dc}^* дає рівняння нелінійного динамічного регулятора напруги зі стійкою внутрішньою динамікою

$$i_{dc}^* = \left[-\tau_{dc}^{-1} (U_m - Ri_{dc}^*) i_{dc}^* - k_v \tau_{dc}^{-1} \tilde{V}_{dc} + \tau_{dc}^{-1} x_v \right] / (U_m - 2Ri_{dc}^*), \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (20)$$

Результати дослідження системи керування САФ, що складається з селективного спостерігача гармонік (3) з $\delta=0.01$, фільтра (10), регулятора струмів компенсації (9) та регулятора напруги ланки постійного струму (20) представлено на рис. 7.

Параметри САФ становлять $R = 0.12$ Ом, $L = 3$ мГн, ємність $C = 1000$ мкФ, $U_m = 310$ В, задане значення напруги в ланці постійного струму $V_{dc}^* = 700$ В. Початкове значення напруги в ланці постійного струму $V_{dc}(0) = 500$ В. В початковий

момент часу від регулятора напруги вимагається зарядити ланку постійного струму до заданого значення напруги $V_{dc}^* = 700$ В.

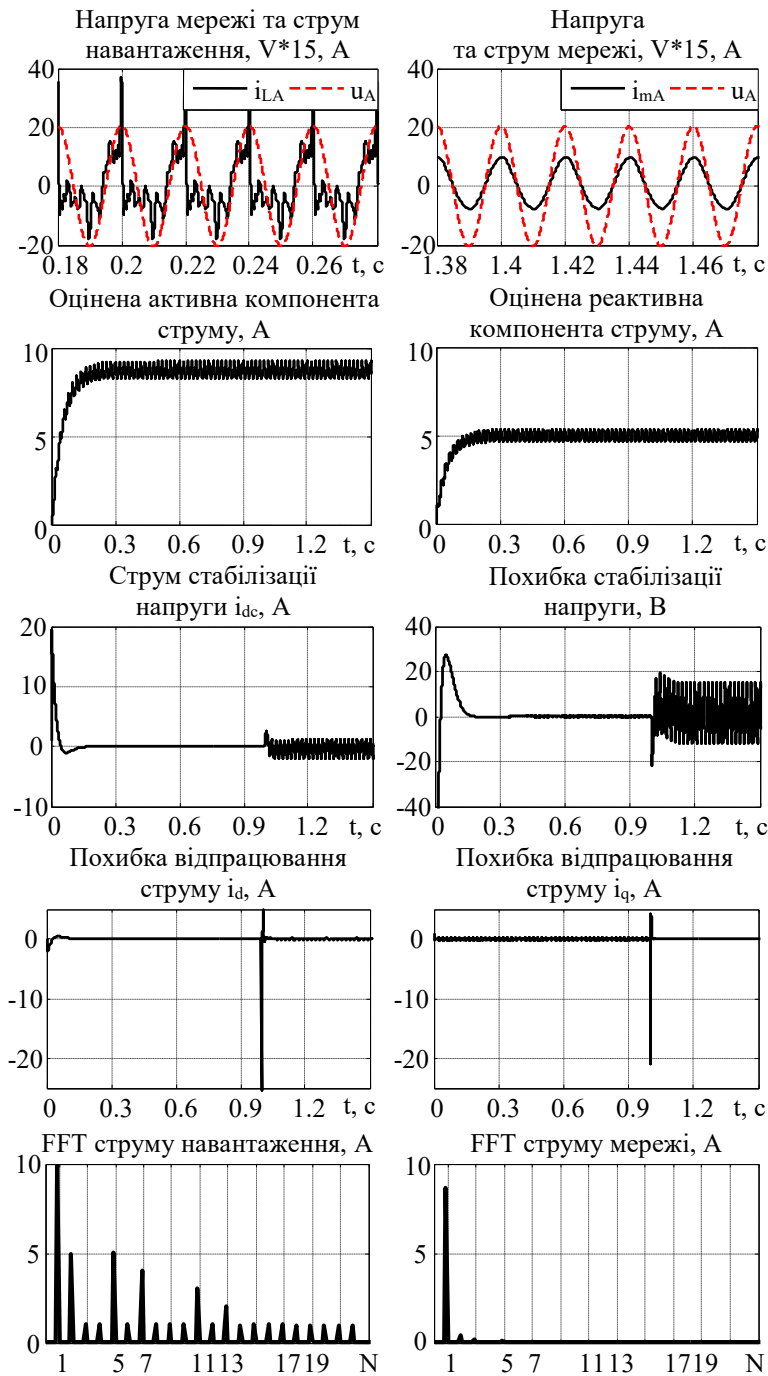


Рис. 7. Динамічні процеси в системі керування САФ

ру. Відповідно до динамічної моделі вищих гармонік (2) і моделі силової частини САФ (6) визначимо задані струми у вигляді (12), а також нові змінні

$$\begin{pmatrix} \xi_{dph} \\ \xi_{qph} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega_h \\ -\omega_h & -\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{dph} \\ X_{qph} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \xi_{dnh} \\ \xi_{qnh} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & -\omega_h \\ \omega_h & -\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{dnh} \\ X_{qnh} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Похідні від нових змінних не залежать від R і мають наступний вигляд:

Спостерігач гармонік при цьому здійснює оцінювання струму навантаження, проте компенсація не здійснюється. В момент часу $t=1$ с активується компенсація гармонічних спотворень.

З представлених графіків встановлюємо, що розроблений регулятор підтримує напругу в ланці постійного струму САФ на заданому рівні, а амплітуда коливань не перевищує 20 В. Найвні вищі гармоніки та активна і реактивна компоненти струму навантаження компенсуються без похибок.

У четвертому розділі розроблено методи керування струмами САФ, які є адаптивними до змін активного опору R та індуктивності силового кола L . Виконані дослідження показують, що в умовах невизначеності R та L , або їх зміни в процесі роботи, асимптотичність відпрацювання струмів порушується. Для компенсації варіацій цих параметрів було синтезовано алгоритми відпрацювання струмів з адаптацією до варіацій активного опору і індуктивності силового кола САФ.

Регулятор струму, адаптивний до варіацій активного опору.

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}_{dph} \\ \dot{\xi}_{qph} \end{pmatrix} = \mathbf{A}_p^h \begin{pmatrix} \xi_{dph} \\ \xi_{qph} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \dot{\xi}_{dnh} \\ \dot{\xi}_{qnh} \end{pmatrix} = \mathbf{A}_n^h \begin{pmatrix} \xi_{dnh} \\ \xi_{qnh} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

В нових координатах задача відпрацювання струмів співпадає з розглянутою в третьому розділі для випадку адаптивного оцінювання вищих гармонік, але алгоритм керування не вимагає інформації про R.

Алгоритм відпрацювання струмів САФ, адаптивний до варіацій опору і індуктивності силового кола. Синтез адаптивного алгоритму відпрацювання струмів здійснено на основі його неадаптивної версії (9). Нелінійний адаптивний регулятор струму має вигляд

$$\mathbf{p}^* = \frac{1}{V_{dc}} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \omega_m \hat{L} \\ -\omega_m \hat{L} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i} + \begin{pmatrix} U_m \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{L} [\hat{\alpha} i_d^* + i_d^* - k_{i1} \tilde{i}_d] \\ \hat{L} [\hat{\alpha} i_q^* + i_q^* - k_{i1} \tilde{i}_q] \end{pmatrix} \right\}, \quad (23)$$

де \hat{L} та $\hat{\alpha}$ – оцінки L та α , які формуються за допомогою синтезованого на основі другого методу Ляпунова алгоритму ідентифікації

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\gamma_1^{-1} (i_d^* \tilde{i}_d + i_q^* \tilde{i}_q), \quad \dot{\hat{L}} = -\gamma_2^{-1} \left((v_d / \hat{L} - \omega_m i_q^*) \tilde{i}_d + (v_q / \hat{L} + \omega_m i_d^*) \tilde{i}_q \right). \quad (24)$$

Нелінійний адаптивний регулятор (23), (24) гарантує системі глобальну експоненційну стійкість для всіх $k_{i1} > 0$, $(\gamma_1, \gamma_2) > 0$ так, що похибки відпрацювання і оцінювання асимптотично сходяться до нуля: $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\alpha}, \tilde{L}) = 0$, де $\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$,

$\tilde{L} = L - \hat{L}$. Цей алгоритм можливо також застосовувати в режимі selfcommissioning» для початкового визначення параметрів вихідного кола САФ.

Дослідження динамічних властивостей адаптивного алгоритму (23), (24) про-

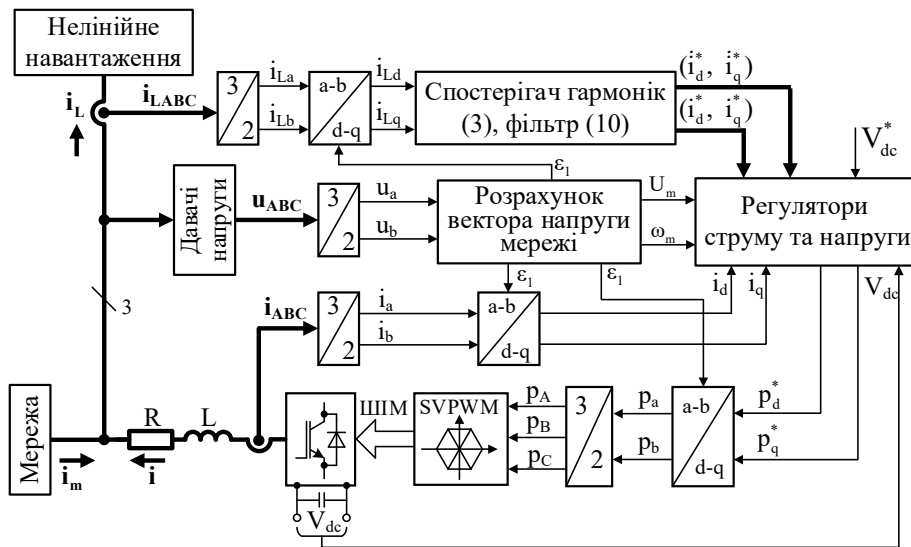


Рис. 9. Структурна схема системи керування САФ

У п'ятому розділі представлено результати практичної реалізації та порівня-

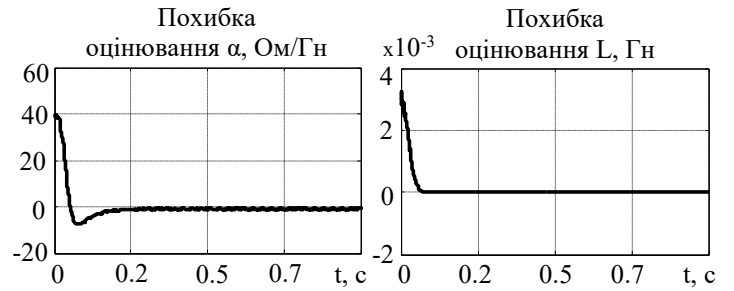


Рис. 8. Динаміка похибок оцінювання невідомих параметрів L та α

ведено в умовах досліду, який розглянуто в розділі 3. Динаміку похибок оцінювання невідомих параметрів L та α представлено на рис. 8 для початкових умов $\hat{\alpha}(0) = 0$, $\hat{L}(0) = 1 \text{ мГн}$.

Повну структурну схему системи керування САФ показано на рис. 9.

льного експериментального тестування розроблених алгоритмів керування САФ. Експериментальні дослідження виконано на розробленій та виготовленій лабораторній установці. Експериментальний прототип силового активного фільтру реалізовано на основі керуючого контролера на базі 32 розрядного цифрового сигнального процесора з плаваючою точкою TMS320F28335 та автономного інвертора напруги на IGBT.

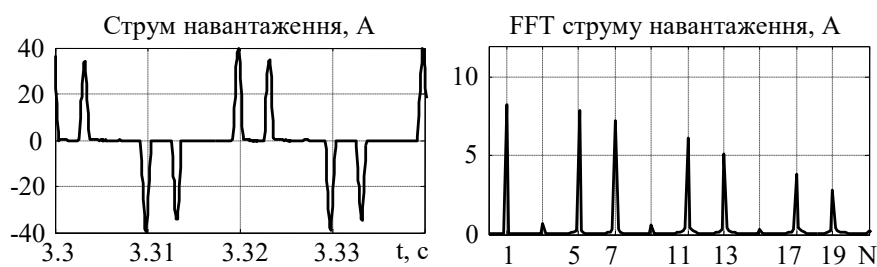


Рис. 10. Струм нелінійного навантаження та його FFT

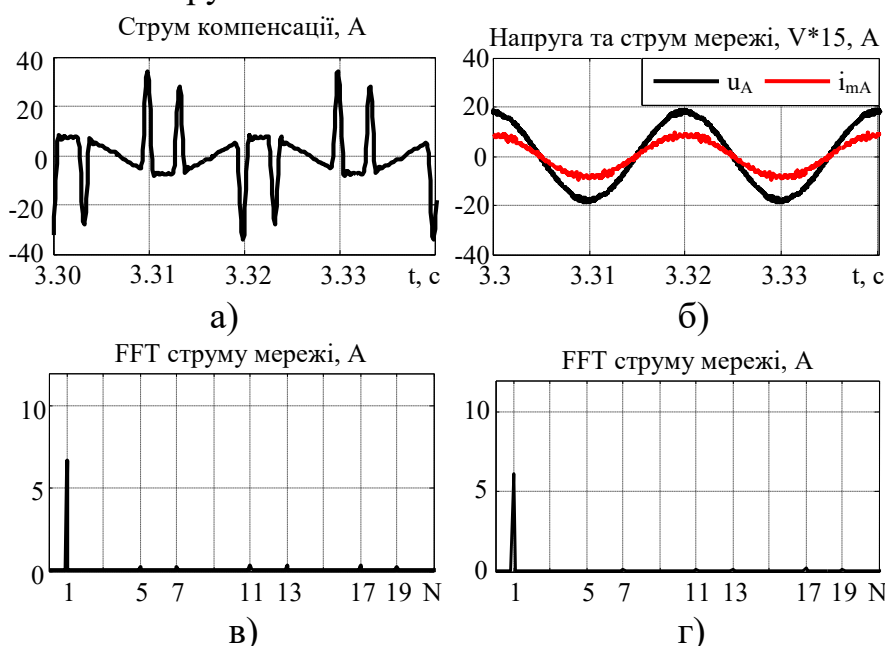


Рис. 11. Результати експериментального дослідження процесів компенсації струмів трифазної мережі

вання та компенсацію гармонік з порядком 5, 7, 11, 13, 17, 19 в селективному режимі, в той час як серійний САФ на компенсацію усіх гармонік. Систему керування прототипу САФ побудовано на основі селективного спостерігача гармонік (3), регулятора струмів (9) та регулятора напруги ланки постійного струму (20). Такт квантування цифрової системи керування встановлено рівним 20 мкс.

Форми струму та напруги, а також відповідні FFT, отримані при тестуванні розробленого прототипу САФ представлено на рис. 11а – рис. 11в, а FFT струму мережі, скомпенсованого за допомогою серійного САФ – на рис. 11г. Форма фазного струму мережі на рис. 11б наближена до синусоїдальної, про що також свідчить FFT струму мережі (рис. 11в). Сумарне гармонічне спотворення скомпенсованого струму мережі в умовах селективної компенсації не перевищує $THD = 9\%$. Як слідує з графіків на рис. 11в і рис. 11г, розроблений САФ забезпечує рівень компенсації гармонічних спотворень струму та реактивної потужності, який наближається до існуючих у провідних світових виробників. Завдяки використанню розроблених в роботі методів оцінювання та керування для селективної компенсації гармонік, розроблений САФ є значно простішим з точки зору практичної реалі-

зовано на основі керуючого контролера на базі 32 розрядного цифрового сигнального процесора з плаваючою точкою TMS320F28335 та автономного інвертора напруги на IGBT.

Експериментальні дослідження роботи серійного САФ провідного світового виробника та розробленого прототипу було проведено за наступних умов. Величину нелінійного навантаження встановлено однаковою для всіх тестів так, що з мережі споживається струм, який показано на рис. 10. Сумарне гармонічне спотворення струму навантаження становить $THD = 150\%$. Розроблений прототип САФ налаштовано на оціню-

зації у порівнянні з серійними аналогами, які орієнтовані на компенсацію усього спектру гармонік. Експертне дослідження серійних виробів провідної світової компанії свідчить, що для САФ з номінальним струмом 200 А оціночне зниження ціни складає 15 тис. євро (з 43 тис. євро до 28 тис. євро).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримала подальший розвиток теорія керування силовими активними фільтрами і на цій основі було вирішено актуальну науково-технічну задачу розвитку методів синтезу, теоретичного та практичного дослідження нових алгоритмів оцінювання гармонічних спотворень та керування координатами САФ з властивостями селективної компенсації, що є важливим для систем підвищення якості електричної енергії в мережах. При цьому отримано наступні основні результати.

1. На основі аналізу існуючих методів керування силовими активними фільтрами обґрунтовано актуальність розвитку методів синтезу та аналізу систем керування силовими активними фільтрами, які гарантують селективне оцінювання та компенсацію гармонічних спотворень.

2. Новий метод формування матриці зворотних зв'язків спостерігача гармонік струму мережі, який базується на специфікації резонансних властивостей його амплітудно-частотних характеристик відносно номеру оцінюваної гармоніки, забезпечує селективність оцінювання критичних гармонік струму з заданою точністю, а також підвищену до 50% (однакову для всіх гармонік) швидкодію оцінювання. Показано, що полюси спостерігача, на відміну від існуючих методів, мають еквідистентне розташування відносно уявної осі комплексної площини, що дозволяє здійснювати синтез спостерігача виходячи із заданого розташування полюсів, зменшити його порядок і кількість слабо демпфованих полюсів.

3. Розроблено метод адаптивного оцінювання фільтрованих сигналів струмів навантаження, що забезпечує підвищення завадозахищеності спостерігача гармонік і відсутність фазових і амплітудних похибок оцінювання.

4. Отримав розвиток метод синтезу алгоритмів керування струмами, що базується на концепції лінеаризації зворотним зв'язком, на основі якого синтезовано алгоритми керування струмами САФ. Розроблені алгоритми забезпечують асимптотичне відпрацювання струмів, не вимагаючи при цьому використання «великих» коефіцієнтів підсилення в контурі регулювання струмів, що спрощує їх практичну реалізацію, і підвищує завадостійкість.

5. Розроблений новий метод керування усередненою напругою ланки постійного струму САФ дозволяє вперше забезпечити динамічну розв'язку процесів керування струмами і напругою за рахунок формування нелінійного динамічного регулятора напруги. При цьому відбувається часткова лінеаризація підсистеми регулювання напруги, що забезпечує асимптотичну стабілізацію усередненого значення напруги ланки постійного струму та асимптотичне відпрацювання заданих значень струмів компенсації.

6. Метод адаптивного керування струмами активного фільтра вперше забезпечує одночасне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій струмів ком-

пенсації гармонічних спотворень, компенсацію реактивної потужності і асимптотичну ідентифікацію невідомих значень активного опору та індуктивності силового кола САФ, що дозволяє уникнути деградації характеристик компенсації в умовах їхньої невизначеності або змін в процесі роботи. Адаптивний алгоритм також придатний для реалізації процедур самоналаштування при ініціалізації системи.

7. Розроблені пакет моделюючих програм та програмне забезпечення для дослідження і практичної реалізації запропонованих в роботі систем керування силовими активними фільтрами дозволяють виконувати повний цикл досліджень та проектування силових активних фільтрів з селективною компенсацією вищих гармонік струму.

8. Результати експериментальних досліджень свідчать, що розроблений прототип САФ забезпечує рівень компенсації гармонічних спотворень струму та реактивної потужності, який наближається до існуючих у провідних світових виробників. Експериментальні данні значною мірою повторюють результати математичного моделювання, що підтверджує достовірність висновків, отриманих теоретичним шляхом.

9. Результати виконаних в дисертації досліджень використовуються компанією ТОВ «Техносервіспривод» в системах підвищення якості електричної енергії, а також в освітньому процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», що підтверджено відповідними актами. Розроблений САФ є значно простішим з точки зору практичної реалізації у порівнянні з серійними аналогами. Експертне оціночне зниження ціни складає до 15 тис. євро для САФ з номінальним струмом 200 А (з 43 тис. євро до 28 тис. євро). Подальше впровадження рекомендовано на підприємствах електротехнічного профілю України.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Зайченко Ю. М., Дученко А. Ю. Спостерігач гармонічного складу трифазного струму для паралельних активних фільтрів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. № 2. С. 57-62.

2. Пересада С. М., Зайченко Ю. М. Дискретний спостерігач гармонічного складу струму трифазної мережі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2018. № 1. С. 80-85.

3. Peresada, S. M., Mykhalskyi, V. M., Zaichenko, Y. M., Kovbasa, S. M. (2018). Selective and adaptive harmonics estimation for three-phase shunt active power filters. *Technical Electrodynamics*, 2018(2), pp. 29-38. (Scopus).

4. Peresada, S., Kovbasa, S., Zaichenko, Y., Reshetnyk, V. (2018). Selective compensation of three-phase current harmonics. *Technical Electrodynamics*, 2018(4), pp. 102-105. (Scopus).

5. S. Peresada, Y. Zaichenko, S. Kovbasa and Y. Nikonenko, "Three-phase current harmonics estimation for shunt active power filters," *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, 2017, pp. 272-275. (Scopus).

6. S. Peresada, S. Kovbasa, D. Pushnitsyn and Y. Zaichenko, "Two nonlinear controllers for voltage source AC-DC converter," *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, 2017, pp. 462-467. (Scopus).

7. S. Peresada, Y. Zaichenko, S. Kovbasa and V. Reshetnik, "Adaptive Current Control for Shunt Active Power Filters," *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2018, pp. 598-604. (Scopus).

8. S. Peresada, Y. Zaichenko, D. Pushnitsyn and V. Reshetnik, "Adaptive Current Control for Shunt Active Power Filters Under Resistance and Inductance Uncertainty," *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 280-285. (Scopus).

9. S. Peresada, Y. Zaichenko and Y. Nikonenko, "Partially Feedback Linearizing DC-Link Voltage Controller for Three-Phase Shunt Active Power Filters," *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 306-309. (Scopus).

10. Зайченко Ю.М. Динамічні властивості та селективність спостерігачів вищих гармонік струму трифазної мережі. *V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» ПРКАП-2019*: збірник матеріалів, 19 грудня 2019 року, НУБіП України, Київ, 2019, с. 19-21.

АНОТАЦІЯ

Зайченко Ю. М. Адаптивне керування силовими активними фільтрами з властивістю селективної компенсації гармонік. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

У дисертаційній роботі отримала подальший розвиток теорія аналізу та синтезу систем керування паралельними силовими активними фільтрами. Розроблено новий метод формування матриці зворотних зв'язків спостерігача гармонік струму мережі, що забезпечує селективність оцінювання критичних гармонік струму та підвищену швидкодію оцінювання. Запропоновано метод керування струмами активного фільтра та синтезовано адаптивні алгоритми відпрацювання струмів, що гарантують одночасне відпрацювання заданих струмів, оцінювання вищих гармонік, а також активного опору і індуктивності вихідного дроселя. Розроблено метод керування напругою ланки постійного струму САФ, який забезпечує часткову лінеаризацію підсистеми напруги та асимптотичне регулювання усереднених значень напруги ланки постійного струму. Застосування отриманих результатів дає можливість значно спростити технічну реалізацію системи керування САФ.

Результати роботи впроваджено: в освітній процес в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», а також компанією ТОВ «Техносервіспривод» для систем підвищення якості електричної енергії.

Ключові слова: силовий активний фільтр, якість електроенергії, вищі гармоніки, компенсація реактивної потужності.

ABSTRACT

Zaichenko Y.M. Adaptive control of the active power filter with selective harmonic compensation properties. – Manuscript. Dissertation for the candidate of technical science degree in specialty 05.09.03 “Electrotechnical Complexes and Systems” (141 - Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

In the dissertation the shunt active power filters control systems are developed. Current harmonics staff estimation is based on observer which utilize idea of division three-phase signal into harmonics of the positive, negative and zero sequences. This observer provides harmonics estimation and compensation current reference calculation.

In order to achieve fast convergence together with selectivity properties of harmonic estimation novel observer tuning procedure is proposed. The dynamic behavior and selectivity properties are investigated by simulations. The proposed tuning procedure simplify practical implementation of harmonic observer by reducing requirements for the computing performance of the controller.

A novel observer with taking into account the presence of phase shift caused by hardware current signal filtering is developed. The observer designed in this way provides the detection of harmonic distortions in a given frequency range, but has no selectivity properties.

Based on the active power filter model, two active power filter current control algorithms, which allow to compensate for harmonic distortion and reactive current, are developed. The first algorithm is based on a separation of harmonic detection and current regulation processes. A new nonlinear algorithm for the active power filter current control, which guarantees asymptotic current tracking and does not require "high" gains, has been developed. From the simulation results it follows that the proposed solution provides asymptotic tracking of the filter currents. The developed current controller is simpler in terms of practical implementation and provides high noise immunity. The second algorithm is the adaptive system for harmonics estimating and current control. This approach is suitable in the case when one need to evaluate and compensate for harmonics in a given range of frequencies.

A method for the SAF DC link voltage control, which provides partial linearization of the voltage subsystem and asymptotic control of the average DC link voltage have been developed.

New algorithm for active power filter current control, which allow to take into account variations of active resistance and inductance of the output filter of the active filter, have been developed. The developed active filter control system do not require a long adjustment process, which is inherent in the industrial active power filters.

The developed observers and controllers are implemented in the prototype of the active power filter, which is based on digital signal processor TMS320F28335. The conducted experimental investigations proved the presented theoretical results.

The results of the work are implemented: in the electrical power quality improvement systems by the company "Technoserviceprivod", Kyiv, in the educational process at the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Keywords: active power filter, electrical power quality, higher order harmonics, reactive power compensation.