

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

МАРУНЯ ЮЛІЯ ВАСИЛІВНА

УДК 621.311:621.316

**СИЛОВІ ГІБРИДНІ ФІЛЬТРИ
ДЛЯ СИСТЕМ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Волков Ігор Володимирович,
Інститут електродинаміки НАН України,
головний науковий співробітник
відділу перетворення та стабілізації
електромагнітних процесів.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Шавьолкін Олександр Олексійович,
Київський національний університет
технологій та дизайну МОН України,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
та електромеханіки;

– кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Олександр Федорович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського» МОН України,
доцент кафедри електронних пристроїв та систем.

Захист дисертації відбудеться «27» 04 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ-57, пр. Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий «23» 03 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Велика кількість електротехнічних пристроїв, наприклад, регульовані електроприводи, зварювальні та інші технологічні установки, сучасні освітлювальні системи, побутове та офісне обладнання здійснюють живлення свого навантаження від мостових випрямлячів з ємнісним фільтром. При цьому відбувається погіршення параметрів якості електроенергії, адже мостовий випрямляч споживає несинусоїдний струм, виступаючи потужним нелінійним навантаженням для систем електропостачання (*СЕП*). Важливою і основною вимогою забезпечення ефективності функціонування та експлуатації децентралізованої *СЕП*, як системи з обмеженою потужністю, є дотримання нормованого рівня параметрів якості електричної енергії. Тому електромагнітна сумісність мостових випрямлячів з децентралізованими *СЕП* є обов'язковою.

Значний вклад у вирішення проблеми підвищення якості електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності споживачів в децентралізованих *СЕП* внесли відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: О.В. Кириленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, І.В. Волков, А.Ф. Жаркін, І.П. Кондратенко, В.Г. Кузнецов, В.М. Михальський, А.А. Щерба, І.В. Жежеленко, К.О. Липківський, В.О. Новський, Г.Г. Жемеров, В.Я. Жуйков, М.С. Комаров, Я.В. Щербак, В.Г. Ягуп, С.П. Денисюк, І.Ф. Домнін, Ю.Л. Саєнко, Г.С. Зінов'єв, В.І. Кочкін, J. Arrillaga, L. Juugyi, M. Depenbrock, H. Akagi, H. Watanabe, S. Singer, D. Paice, F. Peng, T. Kataoka та ін.

Обґрунтування вибору теми досліджень. Забезпечення заданих вимог до електромагнітної сумісності мережі живлення з навантаженнями є одним з напрямків забезпечення надійності функціонування *СЕП* електроприладів різноманітного призначення, особливо, за умови застосування децентралізованих мереж обмеженої потужності. При цьому важливою тенденцією, що визначає вибір структур електропостачання, є зростаючі вимоги до якості вхідного струму споживачів. Відомі технічні рішення базуються на використанні пасивних або активних фільтрів, причому останні представлено паралельними активними коректорами форми струму (*АКФС*) та перетворювачами з активним формуванням вхідного струму. Ці рішення характеризуються різними властивостями, що пов'язані зокрема з часткою перетворюваної активним фільтром потужності, рівнем приглушення вищих гармонік струму, встановленою потужністю реактивних елементів, можливістю їх застосування для груп нелінійних споживачів.

Створення спеціальних пристроїв, що забезпечують узгодження мостових випрямлячів з навантаженням та мережі живлення обмеженої потужності, передбачає, з однієї сторони, вибір раціональних структур пасивних чи активних фільтрів, з іншої сторони, необхідне проведення оптимізації їх елементів в залежності від заданих показників якості з урахуванням параметрів мережі та навантаження. Раціональне вирішення такої задачі за умови мінімальних вартості та встановленої потужності обладнання можливе шляхом формування гібридних структур, що складаються з пасивних фільтрів та *АКФС*, які встановлюються на вході мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром чи навіть на вході групи таких споживачів, та визначення оптимального співвідношення внесків в ефект приглушення вищих гармонік струму за рахунок дії пасивного та активного фільтруючих пристроїв. У разі необхідності реалізації джерела струму для мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром раціональним рішенням є вибір індуктивно-

ємнісного перетворювача (*ІЄП*), що одночасно виконує функцію фільтра вищих гармонік вхідного струму.

Тому розвиток принципів побудови, вдосконалення структур та оптимізації елементів силових фільтрів, спрямованих на забезпечення електромагнітної сумісності однофазних мостових випрямлячів з активним навантаженням та ємнісним фільтром у системах обмеженої потужності, є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів досліджень науково-дослідних робіт за темами: Розвиток теорії та створення засобів забезпечення електромагнітної сумісності споживачів в системах децентралізованої генерації електроенергії «Децентралізація» (Постанова Бюро ВФТПЕ НАНУ від 27.09.11 р., протокол №12, № ДР 0111U009251); Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот «Розплав» (Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 05.07.2016 р., протокол №11, № ДР 0117U002584). При виконанні цих робіт автор обґрунтував напрямки досліджень і розробив принципи побудови структур для забезпечення електромагнітної сумісності мостового випрямляча з активним навантаженням і ємнісним фільтром з системою обмеженої потужності.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток принципів побудови структур та розроблення математичних моделей силових фільтрів, визначення їх ефективності для забезпечення електромагнітної сумісності однофазних мостових випрямлячів з активним навантаженням та ємнісним фільтром в системах децентралізованого електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні задачі:

- визначити базові структури пасивних та активних (напівпровідникових) пристроїв фільтрації струмів для їх встановлення на вході нелінійних споживачів;
- розробити імітаційні моделі для дослідження пасивних *L*- та широкосмугових *ЛМС*-фільтрів, *ІЄП* та *АКФС* на вході випрямляча, а також гібридних структур із застосуванням активних та пасивних пристроїв;
- вивчити властивості та провести оптимізацію параметрів пасивних *L*- та широкосмугових *ЛМС*-фільтрів на вході випрямляча, що функціонують, як окремо, так і у складі гібридних структур;
- провести параметричну оптимізацію елементів активного коректора та вдосконалити алгоритм комутації силових ключів;
- провести порівняльний аналіз властивостей *Г*-, *Т*- та *М*-подібних *ІЄП* для виявлення оптимальних рішень щодо електромагнітної сумісності випрямлячів з активним навантаженням та згладжуючим пульсації ємнісним фільтром на виході;
- провести дослідження силових фільтрів для перевірки показників якості споживаної від мережі енергії, використовуючи теорію планування цілеспрямованих експериментів;
- провести порівняльний аналіз та розробити рекомендації щодо практичного застосування структур силових фільтрів, а також вибору та розрахунків їхніх структурних елементів.

Об'єкт дослідження – мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємні-

сним фільтром в системі децентралізованого електропостачання.

Предмет досліджень – залежності показників якості електричної енергії від параметрів навантаження та елементів гібридних та резонансних фільтрів за умови живлення від децентралізованої мережі.

Методи досліджень. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач ґрунтується на положеннях теоретичної електротехніки, теорії електричних кіл з напівпровідниковими перетворювачами енергії, теорії планування цілеспрямованих експериментів, методах математичного та фізичного моделювання. Підтвердження достовірності результатів теоретичних досліджень забезпечено комп'ютерним імітаційним моделюванням електромагнітних процесів і натурними експериментами.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розвинуто принципи побудови гібридних фільтрів для споживачів електроенергії у вигляді випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням на виході при живленні від мережі обмеженої потужності, що дає змогу забезпечити заданий рівень електромагнітної сумісності за умови мінімальних вартості та встановленої потужності обладнання.

2. Вперше проведено параметричну оптимізацію пасивних фільтрів з властивостями джерела струму на основі *ІСП* при активному навантаженні та згладжуючому пульсації ємнісному фільтрі випрямляча шляхом визначення впливу такого навантаження на значення встановлених потужностей реактивних елементів, що дало змогу виявити найкращий з позицій забезпечення електромагнітної сумісності *ІСП* за схемою *TI-LCL*.

3. Встановлено нові залежності величини номінального струму силового реактора активного коректора форми струму (*АКФС*), який функціонує у комплексі з лінійним реактором на вході мостового випрямляча, від внутрішнього опору короткого замикання мережі живлення при заданому значенні $THD_I < 3\%$, що дало змогу оптимізувати елементи коректора за показниками встановленої потужності за умови забезпечення заданого значення $THD_U < 8\%$.

4. Вперше встановлено оптимальні співвідношення вартості елементів структури на основі *АКФС* та *ЛМС*-фільтра в залежності від заданої величини THD_I та спектру споживаного з мережі струму на вході зазначеного фільтра, при цьому за рахунок введення пасивного фільтра досягається зниження встановленої потужності активного коректора відносно загальної потужності нелінійного споживача.

5. Розвинуто метод керування *АКФС*, який полягає у тому, що на інтервалі накопичення енергії вмикається пара силових ключів по діагоналі однофазного мостового перетворювача, а на інтервалі віддачі вмикається пара силових ключів нижньої групи, що дозволяє зменшити частоту імпульсної модуляції струму в реакторі *АКФС*, кількість керованих напівпровідникових елементів та втрати при їх комутації.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Шляхом імітаційного моделювання та натурних експериментів встановлено залежності показників якості електроенергії силових фільтрів при зміні активного навантаження на виході однофазних мостових випрямлячів з ємнісним фільтром, що дозволило визначити рівень електромагнітної сумісності нелінійного споживача з мережею живлення.

2. Проведено параметричну оптимізацію реакторів *АКФС*, в результаті якої роз-

роблено рекомендації для вибору варіантів реалізації силового реактора L АКФС з урахуванням співвідношення вартості, величини втрат в осерді та його масогабаритних показників, а також виявлено оптимальний варіант реалізації лінійного реактора $L1$ з осердям із електротехнічної сталі $E 360A$ з товщиною стрічки $0,08$ мм, що має приблизно однакову вартість з феритовим осердям, але меншу вагу.

3. Вдосконалено структуру LMC -фільтра шляхом введення додаткової обмотки з індуктивністю $0,8$ мГн, ввімкненої узгоджено до його повздовжньої обмотки (при цьому утворюється T -подібна структура), що дозволило зменшити комутаційні сплески на вході випрямляча в 3-5 рази в залежності від потужності.

4. Проведено розрахунок встановленої потужності АКФС в структурі трифазних гібридних фільтрів та визначено їх вартість, в результаті чого встановлено, що найдешевшим є варіант гібридної структури, в якому використовується LMC -фільтр з $THD_I = 12\%$.

5. Розроблено рекомендації для раціонального вибору та розрахунків структур силових фільтрів для підвищення електромагнітної сумісності нелінійних навантажень.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, теоретичні та практичні результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Публікації [9, 14] написані здобувачем одноосібно. В друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належить: в [1] – розрахунок коефіцієнтів перетворення однофазного мостового однофазного випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром; в [2] – розрахунок питомих потужностей електромагнітних елементів $ІЄП$ за схемою $Г1-LC$ з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням; в [3] – розрахунок питомих потужностей електромагнітних елементів $ІЄП$ за схемою $Г1-LCL$, проведення експерименту на макеті; в [4] – імітаційне дослідження пасивних, активних та гібридних фільтрів гармонік струму; в [5] – проведення порівняльного аналізу $Г$ -подібних індуктивно-ємнісних перетворювачів CL -виду за встановленою потужністю реактивних елементів; в [6] – імітаційне дослідження роботи активного коректора форми струму при малій потужності навантаження, експериментальне дослідження на макеті; в [7] – імітаційне дослідження роботи пасивного LMC -фільтра при малій потужності навантаження, експериментальне дослідження на макеті; в [8] – імітаційне дослідження $ІЄП$ по схемі $Г1-LC$ з мостовим випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням, експериментальне дослідження на макеті; в [10] – імітаційне моделювання алгоритмів переключення транзисторів інвертора активного коректора форми струму у складі гібридного фільтра; [11] – аналіз та розрахунок матеріалів осердь електромагнітних вузлів – реакторів для активних коректорів форми струму; [12] – імітаційне дослідження LMC -фільтра у складі однофазного гібридного фільтра на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням та експериментальне дослідження на макеті; [13] – імітаційне дослідження структур однофазно-трифазних фільтрів гармонік для визначення значення коефіцієнта гармонік струму THD_I і амплітуди цього струму.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися і обговорювалися на чотирьох міжнародних та одній українській конференціях, зокрема: міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка і енергоефектив-

ність» (Алушта, 2013 р.; Харків, 2015р.; Одеса, 2016); «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2020 р.); 38-й Науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Київ, 2020 р.).

Публікації. За результатами дисертації здобувачем опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 5 публікацій відображено в міжнародній наукомеричній базі Scopus. Опубліковано матеріали доповідей на 5 науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 174 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 154 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 20 таблицями, 67 рисунками. Список використаних джерел містить 139 найменувань, з них 103 кирилицею та 36 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність та актуальність роботи, відзначено зв'язок роботи з науковими програмами та планами, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, зазначено особистий внесок здобувача в друкованих працях, наведено відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У першому розділі проаналізовано шляхи вирішення проблем електромагнітної сумісності однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням за умови живлення від децентралізованої СЕП, яка характеризується обмеженою потужністю, досліджено тенденції розвитку та особливості побудови силових гібридних фільтрів.



Рис.1

Сучасна система «СЕП – споживач» (рис. 1) являє собою комплекс, що складається з децентралізованої мережі обмеженої потужності з синусоїдною напругою 220В та частотою 50Гц, яка має відносно великий опір короткого замикання ($Z_{кз}^* > 4\%$), напівпровідникового перетворювача (некерованого мостового випрямляча), що забезпечує формування вихідної вольт-амперної характеристики для живлення активного навантаження з ємнісним фільтром, та схеми узгодження нелінійних вхідних кіл перетворювача з мережею живлення, яка може бути реалізована на основі силових фільтрів, приєднаними послідовно або паралельно до входу випрямляча.

В результаті попереднього аналізу прийнято за основу такі базові структури фільтрів (рис. 2), які можна застосувати для забезпечення електромагнітної сумісності на вході мостових випрямлячів. На підставі вивчення властивостей, недоліків та переваг цих фільтруючих пристроїв визначено умови та принципи побудови силових гібридних фільтрів як основи комплексного підходу при їхній розробці:

В результаті попереднього аналізу прийнято за основу такі базові структури фільтрів (рис. 2), які можна застосувати для забезпечення електромагнітної сумісності на вході мостових випрямлячів. На підставі вивчення властивостей, недоліків та переваг цих фільтруючих пристроїв визначено умови та принципи побудови силових гібридних фільтрів як основи комплексного підходу при їхній розробці:

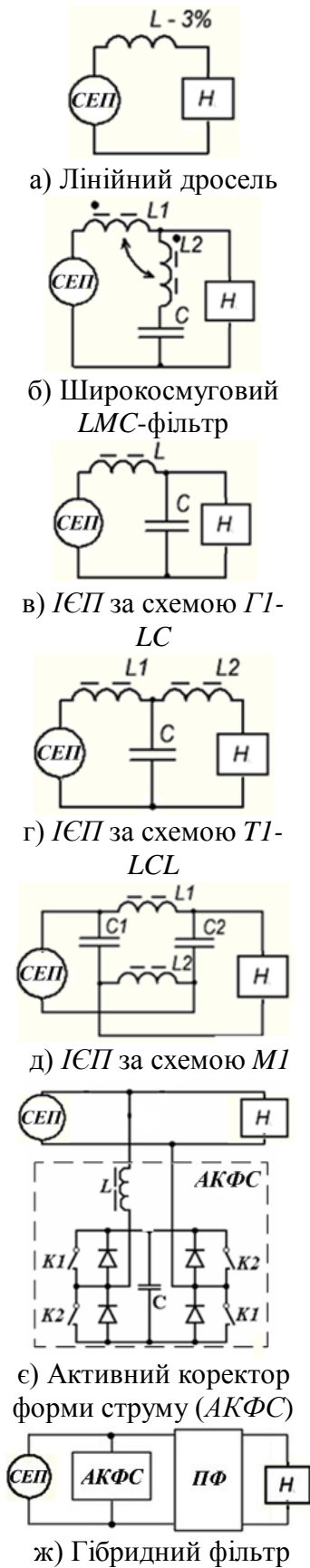


Рис.2

1. Критерієм вибору базових структур (рис. 2) для побудови гібридного фільтра є можливість їх приєднання до випрямляча або навіть групи випрямлячів, що дозволяє уникнути переоснащення вже встановленого обладнання.

2. Забезпечення $\cos\varphi$, близького до одиниці, та THD_I струму споживання $<3\%$ з метою мінімізації впливу на інших споживачів, що підключені до СЕП обмеженої потужності.

3. Мінімізація динамічних втрат АКФС (рис. 2 є) шляхом зменшення частки перетворюваної коректором енергії за рахунок приглушення вищих гармонік струму за допомогою пасивного фільтра у гібридній структурі (рис. 2 ж), вибору оптимальної величини індуктивності реактора коректора та вдосконалення методу керування його силовими ключами.

4. Вдосконалення структури LMC-фільтра (рис. 2 б) для усунення комутаційних сплесків струму на вході випрямляча, які впливають на встановлену потужність елементів АКФС у разі побудови гібридної структури.

5. Визначення оптимального співвідношення параметрів активної та пасивної частин гібридного фільтра (рис. 2 ж) за умови мінімальних вартості та встановленої потужності всього комплексу устаткування з урахуванням заданих показників електромагнітної сумісності.

6. Забезпечення можливості формування вольт-амперної характеристики на виході випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром не тільки виду $U=const$, але й у вигляді $I=const$ шляхом вибору такої структури ІЄП (рис. 2 в, г, д), використання якої дозволяє поєднати в одному пристрої функції джерела струму та пасивного фільтра із заданими показниками електромагнітної сумісності.

У другому розділі на основі теорії планування цілеспрямованих експериментів досліджено режими роботи LMC-фільтра (рис. 2 б) та АКФС (рис. 2 є) з урахуванням режимів зміни навантаження на виході випрямляча, а також проведено оптимізацію елементів цих силових фільтрів.

В електротехнічних системах нерідко виникають ситуації, коли встановлена потужність фільтруючих пристроїв розраховується на максимальне значення навантаження, проте споживачі електроенергії працюють з неповною потужністю, наприклад, за умовами виконання технологічного циклу або у зв'язку з частковим зниженням рівня електроспоживання групи навантажень через відмикання частини споживачів. Для дослідження електромагнітних процесів, що виникають в таких

випадках, а також з метою визначення залежності THD_I від факторів, що впливають на електромагнітну сумісність, організовано експеримент за ортогональним планом другого порядку згідно теорії планування цілеспрямованих експериментів. Струм і

напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися за допомогою приладу *CA Power Quality Analyzer*.

За фактори, для визначення функції цілі THD_1 , обрано X_1 – ємність фільтра C_ϕ , включеного на виході мостового випрямляча, та X_2 – активний опір навантаження R_n . Інтервали варіювання цих факторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

| Рівень варіювання | X_1 (мкФ) | X_2 (Ом) |
|---------------------|-------------------|-----------------|
| Основний рівень | $X_{10}=2200$ | $X_{20}=28$ |
| Інтервал варіювання | $\Delta X_1=1100$ | $\Delta X_2=15$ |
| Верхній рівень | $X_{1max}=3300$ | $X_{2max}=43$ |
| Нижній рівень | $X_{1min}=1140$ | $X_{2min}=13$ |

Після виконання всіх розрахунків та перетворень згідно з ортогональним планом другого порядку, отримано поліноми, які представлено в загальному вигляді рівнянням, за яким визначаються всі функції цілі, що описуються в даній роботі:

$$Y_N = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2, \quad (1)$$

де a_i ($i=0, 1.. 5$) - коефіцієнти поліномів отриманих функцій цілі.

Результати

розрахунків коефіцієнтів a_i для визначення THD_1 досліджуваних структур

| Структура | Y_N | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| АКФС | $THDi$ | 16,47 | -4,07 | 0 | 0,133 | -0,267 | -1,75 |
| ЛМС-фільтр | $THDi$ | 21,57 | 1,02 | -0,7 | -0,45 | -1,8 | -0,3 |

Таблиця 2

наведено в табл. 2. Розрахунки виконано з урахуванням отриманих експериментальних даних при таких параметрах структур «АКФС – випрямляч» та «ЛМС-фільтр – випрямляч»: $L=3$ мГн, $C=4,7$ мФ для схеми АКФС (рис. 2 а) та $L1=5,3$ мГн, $L2=1,23$ мГн, $C=170$ мкФ для схеми ЛМС-фільтра (рис. 2 б). Інші параметри однакові для наведених структур: $U_M=230$ В, $f=50$ Гц, $U_H=300\pm 10\%$ В та фактори X_1 та X_2 .

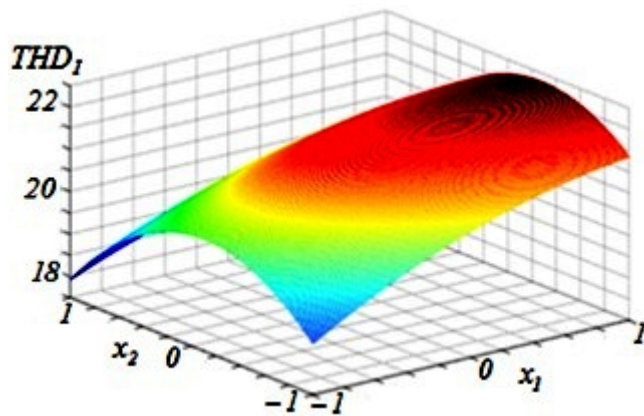


Рис.3

На основі математичних моделей (формула 1, табл. 2) розраховано залежності у вигляді поверхонь відгуків функцій цілі $THD_1=f(C_\phi, R_n)$ в двофакторному просторі x_1, x_2 для ЛМС-фільтра та АКФС, які зображені відповідно на рис. 3 та рис. 4.

В результаті досліджень ЛМС-фільтра (рис. 3) встановлено, що максимальне значення коефіцієнта гармонік струму припадає на середину зміни діапазону навантаження. Значення THD_1 знижується при зменшенні значення ємності фільтруючого конденсатора на виході випрямляча. Це дає підстави використовувати ЛМС-фільтр у гібридній структурі, бо він є слабозалежним від змін навантаження, адже при цьому THD_1 має значення в межах 18 - 22%.

В результаті досліджень АКФС (рис. 4) визначено, що існує значення ємності фільтра, при якому значення THD_1 не змінюється на заданому діапазоні навантаження, а

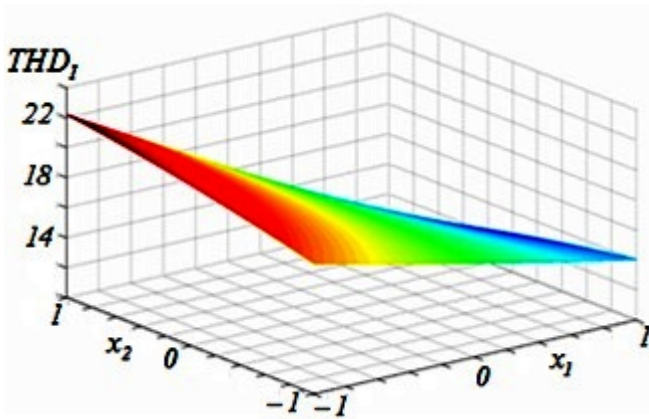


Рис.4

при збільшенні ємності фільтра знижується THD_1 , що відбувається навпаки, ніж у LMC -фільтрі.

Силова частина $AK\Phi C$ складається з реактора L , мостового інвертора та накопичувальної ємності C (рис. 2 *є*). Інвертор коректора керується таким чином, щоб забезпечувати зміну полярності напруги на силовому реакторі L . Це і викликає збільшення або зменшення струму через реактор i , власне, за рахунок цього формується вхідний струм $AK\Phi C$. Процес формування цього

струму здійснюється на високій частоті (до 20 $\kappa\Gamma\upsilon$) і тому в струмі силового реактора L присутні пульсації на частоті імпульсної модуляції. Для приглушення цих пульсацій використовується фільтр вищих гармонік (на рисунку не приведено) з лінійним реактором $L1$, величина індуктивності якого на порядок менша за індуктивність силового реактора L .

Оскільки ці елементи силової частини є одними з тих, які визначають вартість, втрати потужності та масогабаритні показники $AK\Phi C$, проведено оптимізацію електромагнітних вузлів – реакторів з різними матеріалами осердь для поліпшення їх параметрів. Було визначено оптимальний варіант матеріалу осердь реакторів $AK\Phi C$, розрахованого на амплітудне значення струму 50 A . Як матеріали осердь електромагнітних вузлів обрано такі: електротехнічну сталь $E 360A$ з товщиною стрічки $0,08$ mm , аморфний сплав $2605 SA1$, ферит фірми «Teratron» з матеріалом осердя $CF 196$. Розрахунки реакторів проводилися з урахуванням того, що через ці осердя проходять магнітні потоки різної частоти (частоти мережі живлення і частоти модуляції з максимальним значенням $F_{max} = 20$ $\kappa\Gamma\upsilon$). Остання визначає втрати в осердях, а на частоті мережі живлення визначається лінійність реакторів при струмі насичення $60A$. Було розраховано три варіанти реакторів з різними матеріалами осердь і визначено їх основні параметри: вагу, габаритні розміри, втрати в міді та в осерді. Два варіанти з матеріалом осердь з електротехнічної сталі $E 360A$ з товщиною стрічки $0,08$ mm і аморфним сплавом $2605 SA1$ було виготовлено та випробувано на лінійність вольт-амперної характеристики та у складі $AK\Phi C$. Теоретичні та експериментальні дослідження реакторів дозволили обрати оптимальні за комплексом вимог (вага, габаритні розміри, втрати, вартість) матеріали осердь. Для силового реактора L активного коректора, як матеріал осердя, обрано аморфний сплав $2605 SA1$, а для реактора високочастотного фільтра струму $L1$ – електротехнічну сталь $E 360A$ з товщиною стрічки $0,08$ mm .

В ході досліджень з'ясовано, що при застосуванні LMC -фільтра на вході випрямляча в кривій споживаного струму спостерігаються комутаційні сплески (рис. 5 *а*), до того ж параметри цього сплеску суттєво впливають на встановлену потужність елементів $AK\Phi C$. Так, амплітуда комутаційного сплеску характеризує значення максимального відхилення відносно першої гармоніки вхідного струму споживання з мережі живлення. Від величини цього відхилення залежить встановлена потужність елементів коректора, крім того крутизна наростання та спаду сплеску струму впливає

на величину коефіцієнту гармонік вхідного струму THD_I , а також на частоту комутації інвертора АКФС.

Для нейтралізації негативного впливу комутаційного сплеску струму вдосконалено LMC-фільтр шляхом введення в його структуру додаткової обмотки L_d між поздовжньою обмоткою фільтра та входом випрямляча. Шляхом імітаційного моделювання за допомогою програми *MicroCap10* отримано значення індуктивності обмотки $L_d=0,8$ мГн, за яким досягається приглушення зазначеного сплеску струму (рис. 5 б). Це дозволяє знизити частоту комутації АКФС, а отже, підвищити коефіцієнт корисної дії та зменшити встановлені потужності його елементів.

У третьому розділі досліджено однофазні та трифазні гібридні фільтри на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Проведено оптимізацію елементів АКФС у складі гібридної структури (рис. 6). Шляхом імітаційного моделювання в спеціалізованій програмі *Omega 2010*, розробленій в Інституті електродинаміки НАН України, досліджено однофазні варіанти гібридного фільтра (рис. 2 ж), реалізованих в активній частині на основі АКФС, а в пасивній частині в одному випадку з 3% лінійним реактором, а в другому – з широкосмуговим LMC-фільтром. Для спрощення моделювання АКФС імітовано паралельним з'єднанням джерел струму, що генерують струм активного коректора $I_{a\phi}$, який можна представити рядом Фур'є як суму гармонік різної амплітуди (позначено як $A\Phi$).

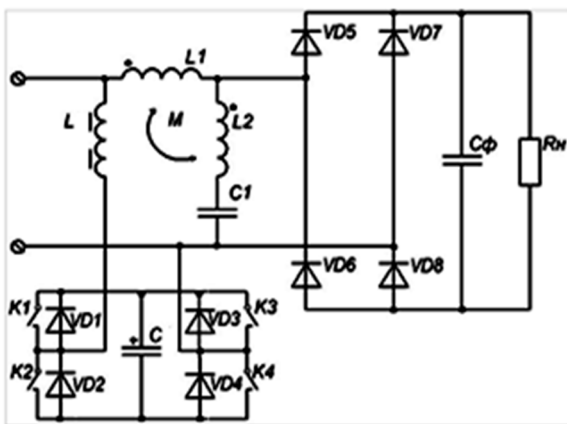


Рис.6

послідовно з ємністю конденсатора $C1$ LMC-фільтра, до виходу якого приєднано однофазний мостовий випрямляч (діоди $VD1-VD4$) з ємнісним фільтром C_ϕ і опором навантаження R_n (рис. 6). Для порівняння було досліджено варіант роботи мостового випрямляча від мережі без фільтруючих засобів та при використанні 3% лінійного реактора і широкосмугового LMC-фільтра. Результати такого моделювання наведено в табл. 3, де $I_3-I_9, \%$ – відсоткові складові з 3-ої по 9-ту гармоніки вхідного струму. Коефіцієнт гармонік струму в схемі з одним тільки LMC-фільтром становив 18,3% і знизився до 2,7% у гібридній схемі (табл. 3, варіанти 3 та 5), а діюче значення струму $A\Phi$ вдалося знизити в порівнянні з використанням на вході випрямляча 3% реактора (варіанти 4 та 5, табл. 3) з 23,3 А до 5,6 А, при цьому амплітудне значення струму знизилось відповідно з 48,8 А до 10,1 А. Таке технічне рішення (LMC+A Φ) дозволило знизити діюче значення струму активного фільтра, а отже його масогабаритні показ-

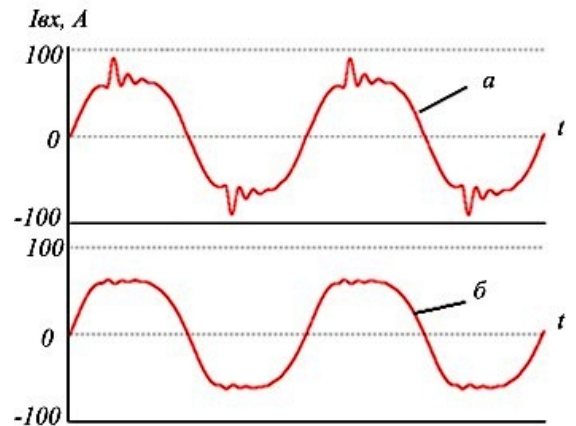


Рис.5

ники і, відповідно, вартість. Порівняння розглянутих варіантів проведено при потужності навантаження 5 кВт.

Таблиця 3

| Варіанти | $I_{вх}, A$ | $I_{афr.m.s.}, A$ | $I_{маф}, A$ | U_H, B | I_H, A | $THD_I, \%$ | $I_3, \%$ | $I_5, \%$ | $I_7, \%$ | $I_9, \%$ |
|---------------|-------------|-------------------|--------------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 Без фільтра | 40,3 | - | - | 288,6 | 17,4 | 132,6 | 90,3 | 73,0 | 51,6 | 30,3 |
| 2 3% Лл.р. | 33,8 | - | - | 284,8 | 17,8 | 95,1 | 79,2 | 47,5 | 19,0 | 6,6 |
| 3 LMC | 31,6 | - | - | 303,8 | 16,5 | 18,3 | 15,7 | 2,5 | 3,1 | 3,2 |
| 4 3% Лл.р.+АФ | 24,2 | 23,3 | 48,8 | 285,1 | 17,6 | 2,6 | 0,8 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| 5 LMC+АФ | 31,1 | 5,6 | 10,1 | 303,9 | 16,5 | 2,7 | 0,2 | 0,05 | 0,11 | 0,04 |

Масогабаритні показники силової частини АКФС в значній мірі визначаються величиною індуктивності силового реактора L (рис.6), але її мінімальне значення обмежується максимальною частотою імпульсної модуляції, що обумовлено динамічними властивостями транзисторів мостового інвертора коректора. АКФС може функціонувати в таких станах силового реактора L : «накопичення енергії – прискорена її віддача», «прискорене накопичення енергії – її віддача», «накопичення енергії – її віддача». Саме останній стан прийнято до розгляду в цій роботі.

На інтервалі накопичення енергії, коли увімкнені ключі $K1$ та $K4$ (рис. 6), напруга на реакторі L визначається як $u_L^H = U_C - u_S$ (рис. 7). В режимі віддачі при увімкнених ключах $K2$ та $K4$ напруга на реакторі L дорівнює $u_L^B = u_S$. Тривалість інтервалів накопичення ΔT_H та віддачі ΔT_B визначаються формулами $\Delta T_H = L \cdot \Delta I / u_L^H$ та $\Delta T_B = L \cdot \Delta I / u_L^B$. У такому разі частота імпульсної модуляції ключів визначається як $F_m = 1 / (\Delta T_H + \Delta T_B)$ або $F_m = u_S (U_C - u_S) / U_C L \cdot \Delta I$.

Напруга мережі живлення змінюється як $u_S = U_m \sin \omega t$. З урахуванням підстановок $U_m / U_C = a$ та $\omega t = x$, частота імпульсної модуляції буде визначатися відповідно до виразу

$F_m = (U_C / L \cdot \Delta I) (a \sin x - a^2 \sin^2 x)$. Цей вираз має параболічний, неоднозначний за аргументом a , характер зміни функції F_m (рис. 8), яка набуває максимального значення при $x = \pi/2$, $U_C = 720B$, $L = 3,0$ мГн, $\Delta I = 6A$, $a = 0,5$, тобто $F_{max} = u_C / 4L \cdot \Delta I = 10$ кГц. Це значення F_{max} у два рази менше за значення частоти модуляції $F_{max} = 20$ кГц, коли силовий реактор АКФС працює в стані «накопичення енергії – прискорена її віддача».

На рис. 9 зображено залежність зміни функції F_m / F_{max} при постійному значенні $a = 0,5$. Комп'ютерне моделювання такої схеми (рис.6) було реалізовано в Omega 2010. Параметри схеми для мо-

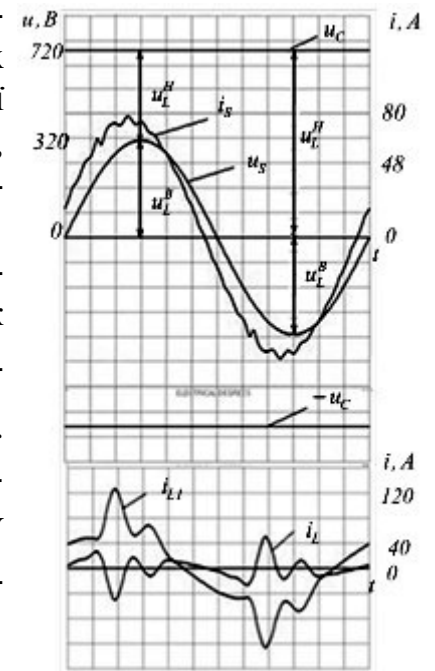


Рис.7

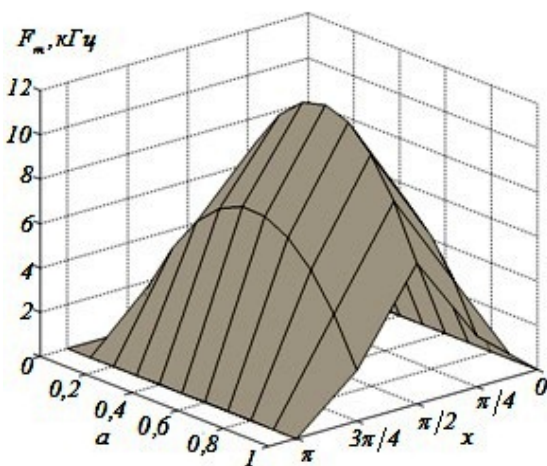


Рис.8

делювання були такими: $U_M=230\text{ В}$, частота напруги 50 Гц , потужність навантаження 10 кВт ($U_H=300\pm 10\% \text{ В}$), $L=3\text{ мГн}$ та $C=4,7\text{ мФ}$, ємність конденсатора фільтра $C_\phi=10\text{ мФ}$. LMC -фільтр, що має $THD_I=30\%$, представлено реактором з індуктивностями $L1=3\text{ мГн}$, $L2=8\text{ мГн}$ та конденсатором з ємністю $C1=170\text{ мкФ}$. Ці параметри обиралися за умови забезпечення рівня максимального амплітудного значення струму силового реактора $L\text{ АКФС}$ $I_{max}=50\text{ А}$, ($I_{rms}=16,91\text{ А}$) для порівняння із значеннями струмів та напруг в стані реактора «накопичення енергії – прискорена її віддача».

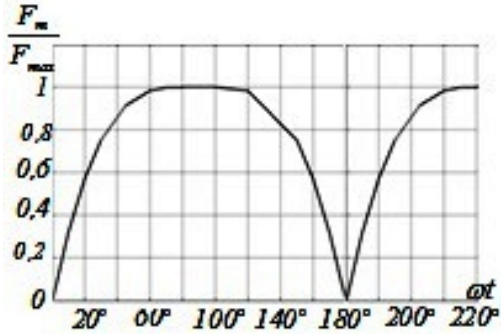


Рис.9

На рис.7 представлено епюри струмів, де i_L та i_{L1} – струми $AK\Phi C$ та пасивного LMC -фільтра відповідно. Для зменшення встановленої потужності $AK\Phi C$ було проведено моделювання, результати якого наведено на рис. 10, де i_L^* та i_{L1}^* – струми $AK\Phi C$ та пасивного LMC -фільтра, що має покращений $THD_I=12\%$ при тих саміх заданих початкових параметрах схеми, але з індуктивностями $L1=5,3\text{ мГн}$, $L2=1,23\text{ мГн}$. При цьому повна компенсація споживаного струму досягається при максимальному амплітудному значенні струму $AK\Phi C$ $I_{max}^*=16,98\text{ А}$ та діючому $I_{rms}^*=6,5\text{ А}$. Ці значення струмів $AK\Phi C$ втричі менші, ніж до оптимізації на потужності навантаження 10 кВт , таким чином, потужність $AK\Phi C$ вдалося зменшити з 4 кВт до $1,5\text{ кВт}$ за рахунок використання покращеного LMC -фільтра.

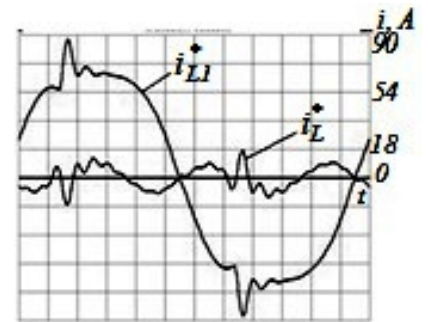


Рис.10

Активні коректори називаються паралельними, хоча безпосереднє їх під'єднання паралельно до випрямного мосту є недоцільним, адже виникають сплески струму при заряді ємності фільтра на виході мостового випрямляча.

Для усунення їх негативного впливу на $AK\Phi C$ зазвичай використовують лінійний реактор на вході мостового випрямляча.

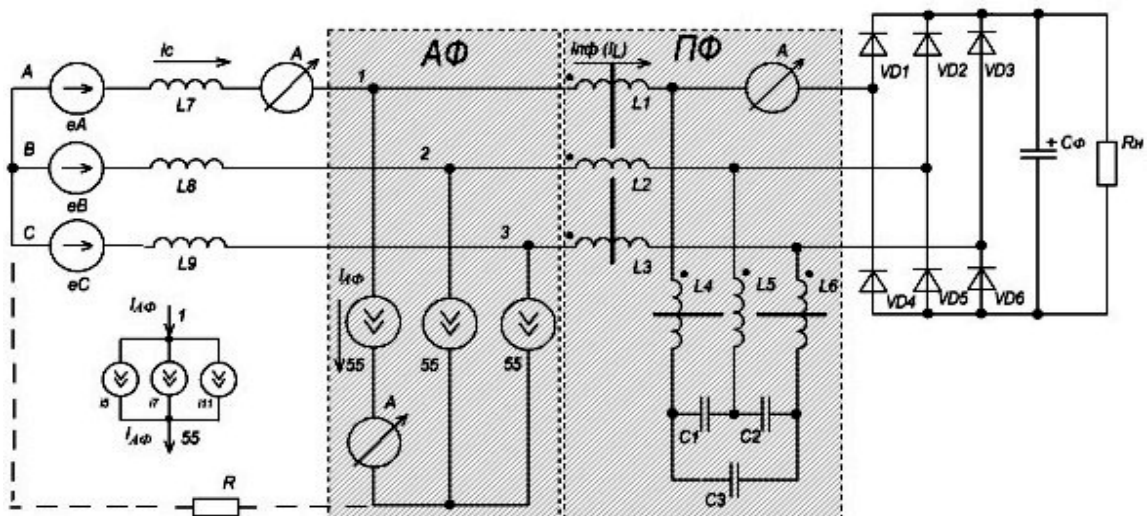


Рис.11

Проведено дослідження впливу такого додаткового реактора (представлено на *рис. 11* індуктивностями $L1, L2, L3$, при цьому індуктивності $L4, L5, L6$ не застосовуються) та внутрішнього опору короткого замикання мережі живлення Z_{K3}^* (на *рис. 11* представлено реактивностями $L7, L8, L9$) на роботу АКФС.

Отримано залежності величини номінального струму реактора АКФС, що функціонує у комплексі з лінійним реактором від внутрішнього опору короткого замикання мережі живлення у вигляді поверхонь $THD_U = f(Z_{K3}^*, Z_D^*)$ (*рис.12*) та $I_{A\Phi}^* = f(Z_{K3}^*, Z_D^*)$ (*рис.13*), де Z_D^* – відносний індуктивний опір (*reactance*) додаткового реактора, Z_{K3}^* – відносний опір короткого замикання мережі живлення.

Ізолінія має незмінний рівень $THD_U = 8\%$ (для мереж $0,4кВ$), що визначає зону забезпечення електромагнітної сумісності АКФС з мережею (при $THD_I < 3\%$): правіше цієї ізолінії будь-яке поєднання параметрів Z_{K3}^*, Z_D^* неприпустиме.

Поєднанням цих параметрів відповідає певна величина номінального струму АКФС, відносна величина якого зображена на поверхні

$I_{A\Phi}^* = f(Z_{K3}^*, Z_D^*)$, тобто $I_{A\Phi}^* = 1$ при $I_{A\Phi} = 123 А$. Наприклад, для мережі з $Z_{K3}^* = 6\%$ потрібно використовувати $Z_D^* = 7\%$. Використання цих поверхонь дає змогу оптимізувати елементи активного коректора за показниками встановленої потужності та визначити область його надійної роботи.

При розробці гібридної конфігурації фільтра розглядалась задача з'ясування можливості зниження вартості гібридного фільтра зі збереженням головної переваги АФ – здатності забезпечити задану якість фільтрації гармонік струму при будь-якому навантаженні. Для цього досліджено трифазний варіант системи обмеженої потужності з мостовим випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням потужністю $250 кВт$ (*рис. 11*) та визначено вплив пасивної частини гібридної структури на встановлену потужність активної. АКФС зображено на *рис.11* як АФ паралельного типу, який представлено трьома джерелами струму $I_{A\Phi}$ 5-ої, 7-ої та 11-ої гармонік для кожної фази (на рисунку показано для фази I).

Встановлено, що при фільтруванні вхідного струму лінійним 3% реактором, THD_I становить 40% і для забезпечення коефіцієнта гармонік вхідного струму на рівні 3% потрібен активний коректор із встановленою потужністю $85 кВА$, що становить 34% потужності навантаження. Саме вона визначає високу вартість АКФС. При використанні LMC-фільтра з власним THD_I на рівні 12% , для зниження цього коефіцієнта

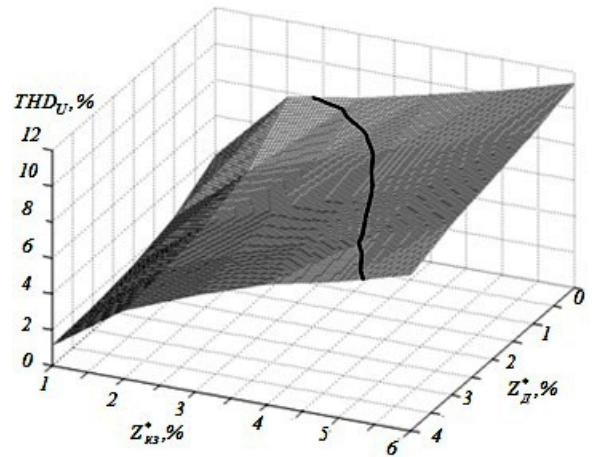


Рис.12

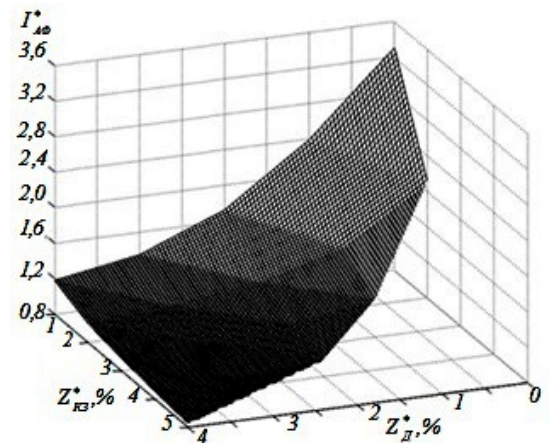


Рис.13

потрібен активний коректор потужністю вже 35 кВА , що становить всього 14% потужності навантаження, тому досліджено як від спектру гармонік струму споживання залежить діюче значення струму $AK\Phi C$, його потужність та вартість.

В сучасних активних фільтрах з використанням $IGBT$ -транзисторів передбачено їх тепловий захист, що необхідно в зв'язку з можливим перегрівом транзисторів через збільшення динамічних втрат в них на підвищених частотах, що автоматично знижує рівень діючого струму активних фільтрів і це призводить до збільшення THD_1 вхідного струму та змушує споживача використовувати фільтр з пропорційно завищеним номінальним струмом.

Таблиця 4

| № | Структури фільтрів | $I_{A\Phi}, A$ | $S_{A\Phi}, \text{кВА}$ | I_5, A | I_7, A | I_{11}, A | Ціна АФ, тис. \$ | Ціна ПФ, тис. \$ | Ціна ГФ, тис. \$ |
|----|-------------------------------|----------------|-------------------------|----------|----------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | $A\Phi$ з $2\% Ld.p. Rated$ | 123 | 85 | 113 | 39 | 24 | – | – | – |
| 1* | $A\Phi$ з $2\% Ld.p. Derated$ | 196 | 111 | 161 | 78 | 80 | 23,8 | – | – |
| 2 | $A\Phi$ з ПФ- $10\% Rated$ | 39 | 26,9 | 35 | 4 | 12 | – | – | – |
| 2* | $A\Phi$ з ПФ- $10\% Derated$ | 64 | 44,2 | 50 | 8 | 40 | 10,4 | 3,3 | 13,7 |
| 3 | $A\Phi$ з ПФ- $12\% Rated$ | 50 | 34,7 | 46,8 | 5,7 | 17,7 | – | – | – |
| 3* | $A\Phi$ з ПФ- $12\% Derated$ | 89 | 61,4 | 67 | 11 | 59 | 11,0 | 2,5 | 13,5 |
| 4 | $A\Phi$ з ПФ- $14\% Rated$ | 66,7 | 46 | 64 | 3 | 16 | – | – | – |
| 4* | $A\Phi$ з ПФ- $14\% Derated$ | 119 | 82 | 91 | 10 | 77 | 12,0 | 2,0 | 14,0 |

Встановлено, що розрахункова вартість розглянутих варіантів гібридних фільтрів практично однакова та істотно менша за вартість окремого $A\Phi$ тієї ж потужності: в $1,8$ рази (табл. 4, де $Ld.p.$ – додатковий 2% лінійний реактор, ПФ – пасивні LMS -фільтри з власним рівнем THD_1 , $Rated$ – розрахунковий рівень номінального струму, $Derated$ – вимушено знижений рівень номінального струму, зумовлений тепловим захистом транзисторів інвертора, $I_{A\Phi}$ – діюче значення струму активного фільтра, $S_{A\Phi}$ – встановлена потужність розглянутих варіантів, I_5, I_7, I_{11} – рівні амплітуд 5-ої, 7-ої, 11-ої гармонік струму $A\Phi$).

Один й той самий рівень THD_1 можна забезпечити різними співвідношеннями активної та пасивної складових в структурі гібридного фільтра в залежності від поставленої задачі оптимізації (рис. 14). В такому випадку вирішується компромісна задача оптимізації з урахуванням досягнення таких цілей:

- мінімальні масогабаритні показники;
- висока надійність;
- мінімальна вартість.

Найкращим у такому випадку є варіант пасивного фільтра з $THD_1 = 12\%$, проте кожен з розглянутих варіантів може бути кращим в залежності від конкретного випадку.

У четвертому розділі досліджено електромагнітні процеси в однофазному мостовому випрямлячі з ємнісним фільтром та активним навантаженням при живленні безпосередньо від $ІЄП$ (рис. 2 в, г, д), який одночасно виконує функції фільтра та джерела струму. Такий випрямляч з $ІЄП$ на вході називають струмопараметричним, що пояснюється формуванням вихідної струмової характеристики за рахунок резонансно-

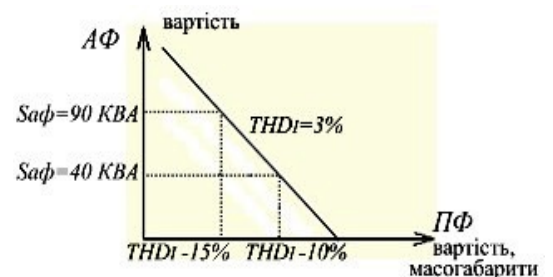


Рис.14

го налагодження параметрів реактивних елементів перетворювача. Наявність ємності конденсатора фільтра C_ϕ на виході мостового випрямляча обумовлює два режими роботи такого випрямляча: перший, коли напруга на вході випрямляча більша напруги на ємності конденсатора фільтра C_ϕ і діоди $VD1, VD4$ ($VD2, VD3$) відкриті (рис. 2 в, з, д); другий – всі діоди закриті, оскільки напруга на вході випрямляча менша напруги на ємності конденсатора фільтра C_ϕ і для ІЄП це режим холостого ходу. Проведено дослідження електромагнітних процесів такої системи з Γ -, T - та M -подібними схемами ІЄП за ортогональним планом другого порядку згідно теорії планування цілеспрямованих експериментів.

За функції цілі обрано абсолютні Q , питомі q потужності реакторів та конденсаторів та повна потужність $S_{H\text{ ІЄП}}$ ІЄП, коефіцієнти гармонік струму THD_1 , перетворення за напругою k_u , перетворення за струмом k_i , пульсацій k_n , а також $\cos\varphi$ та ψ (кут $\psi = \omega\Delta t$, де Δt - час, протягом якого напруга на фільтруючому конденсаторі $u_{C_\phi} = u_{\text{вих.в}}$ більше за напругу на вході випрямляча $u_{\text{вх.в}} = u_C$, при цьому мостовий випрямляч не проводить струм). Як фактори обрано X_1 – ємність конденсатора фільтра (C_ϕ), віднесена до базової величини ємності ІЄП $C=50\text{ мкФ}$ та X_2 – опір навантаження R_n , віднесений до вхідного опору ІЄП $x_L = \omega L = 57,8\text{ Ом}$, де $L=184\text{ мГн}$. Для порівняння якісних характеристик діапазон зміни факторів обрано однаковим для всіх схем ІЄП. Струм і напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися пристроєм *CA Power Quality Analyzer*. Перший фактор X_1 змінювався від $X_{1\text{min}}=9$ до $X_{1\text{max}}=18$ за рахунок зміни ємності фільтра C_ϕ від 450 мкФ до 900 мкФ (основний рівень 675 мкФ , інтервал варіювання 225 мкФ). У другому факторі X_2 змінювався опір навантаження R_n від 24 Ом до 110 Ом , (основний рівень 67 Ом , інтервал варіювання 43 Ом). При цьому $X_{2\text{min}}=0,415$, а $X_{2\text{max}}=1,9$.

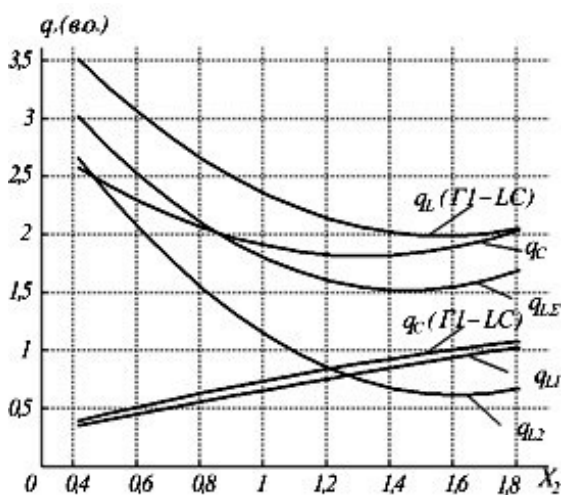


Рис.15

Після проведення кодування факторів з урахуванням обраних інтервалів варіювання було проведено експерименти по ортогональному плану другого порядку, на підставі чого визначено коефіцієнти поліномів кодованих змінних та отримано поліноми (формула 1), коефіцієнти яких наведено в табл. 5. Отримані результати дають змогу провести розрахунок елементів ІЄП у випадку його роботи на мостовий однофазний випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням.

Дослідження електромагнітних процесів в системі «ІЄП за схемою ΓI - LC – однофазний мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром» дозволило продемонструвати, що ця система має хорошу електромагнітну сумісність з мережею живлення ($THD_1 < 6\%$), але низький коефіцієнт потужності ($PF = \cos\varphi \cdot [1 + (THD_1)^2]^{-1/2}$, де $\cos\varphi = 0,29 \div 0,67$) в діапазоні варіювання по-

тужності навантаження від 0,3 до 1,2 кВт.

В ході дослідження інших ІСП встановлено, що як джерело струму для однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та емнісним фільтром доцільно використовувати ІСП, що виконано за схемою *Π1-LCL* (рис. 2 з). Така структура має найкращі показники електромагнітної сумісності ($\cos\varphi=0,95\div 0,99$, $THD_I < 3\%$) і менші значення потужності реакторів $L1$ та $L2$ $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$ в.о. (відносні одиниці), ніж у *Π1-LC* ($\hat{q}_L = 1,97$ в.о.) (рис. 15). Значення відносних питомих потужностей визначено за допомогою математичних моделей (формула 1, табл. 5).

Таблиця 5

| ІСП | Y_N | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 |
|--|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>Π1-LC</i> $L=184$ мГн $C=50$ мкФ | k_i | 0,75 | $3,33 \cdot 10^{-3}$ | $-5,13 \cdot 10^{-2}$ | $4,33 \cdot 10^{-3}$ | $2,13 \cdot 10^{-3}$ | $2,25 \cdot 10^{-3}$ |
| | k_u | 1,06 | $1,83 \cdot 10^{-3}$ | $5,38 \cdot 10^{-2}$ | $-2,18 \cdot 10^{-3}$ | $-2,38 \cdot 10^{-2}$ | $-2,75 \cdot 10^{-3}$ |
| | ψ | 74,56 | 1,52 | 16,92 | -1,52 | -6,12 | -0,65 |
| | THD_I | 3,68 | 0,1 | 1,99 | 0,13 | -0,62 | -0,08 |
| | k_n | 3,61 | -1,68 | -2,42 | 0,78 | 1,48 | 0,53 |
| | Q_{L1} | 2,05 | $-1,9 \cdot 10^{-2}$ | 0,99 | $-1 \cdot 10^{-2}$ | 0,16 | $-1,1 \cdot 10^{-2}$ |
| | Q_{C1} | 0,82 | $6,2 \cdot 10^{-3}$ | 0,35 | $1,95 \cdot 10^{-2}$ | $-6,55 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| | q_{L1} | 2,16 | $2,16 \cdot 10^{-2}$ | -0,69 | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | 0,61 | $-4,25 \cdot 10^{-2}$ |
| q_{C1} | 0,78 | $6,16 \cdot 10^{-3}$ | 0,35 | $1,95 \cdot 10^{-2}$ | $-6,55 \cdot 10^{-2}$ | $0,75 \cdot 10^{-4}$ | |
| <i>Π1-LCL</i> $L1=L2=184$ мГн $C=50$ мкФ | Q_{L1} | 513,95 | 8,36 | 492,92 | 9,37 | 72,43 | 12,55 |
| | Q_{L2} | 697,49 | -2,74 | -33,44 | 36,47 | 6,37 | -1,05 |
| | $Q_{L\Sigma}$ | 1211,44 | 5,62 | 459,48 | 45,84 | 78,8 | 11,51 |
| | Q_C | 1417,98 | 10,1 | 773,17 | 15,63 | 118,43 | -2,75 |
| | $S_{H\text{ ІСП}}$ | 713,67 | -8,14 | 386,46 | 39,24 | -62,96 | -2,79 |
| | q_{L1} | 0,72 | $1,53 \cdot 10^{-2}$ | 0,34 | $-2,73 \cdot 10^{-2}$ | $-2,03 \cdot 10^{-2}$ | $1,43 \cdot 10^{-2}$ |
| | q_{L2} | 0,91 | $6 \cdot 10^{-2}$ | -0,99 | $-5 \cdot 10^{-2}$ | 0,76 | $-7,75 \cdot 10^{-3}$ |
| | $q_{L\Sigma}$ | 1,63 | $7,53 \cdot 10^{-2}$ | -0,64 | $-7,73 \cdot 10^{-2}$ | 0,74 | $0,65 \cdot 10^{-2}$ |
| | q_{C1} | 1,99 | $1 \cdot 10^{-2}$ | -0,24 | $-9 \cdot 10^{-2}$ | 0,49 | $-5 \cdot 10^{-3}$ |
| | P_n | 599,78 | 1,18 | 308,72 | 17,37 | -44,01 | 1,46 |
| <i>М1</i> $L1=L2=184$ мГн $C1=C2=50$ мкФ | $Q_{L\Sigma}$ | 933,38 | 7,46 | 704,38 | -5,28 | 108,48 | 11,18 |
| | $Q_{C\Sigma}$ | 936,8 | 4,66 | 312,8 | -25,2 | 86,4 | 7 |
| | $S_{H\text{ ІСП}}$ | 725,42 | 1,33 | 446,93 | -4,13 | -32,53 | 0 |
| | $q_{L\Sigma}$ | 1,29 | $4,4 \cdot 10^{-3}$ | $7,96 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | 0,17 | $1 \cdot 10^{-2}$ |
| | $q_{C\Sigma}$ | 1,29 | $3,34 \cdot 10^{-3}$ | -0,85 | $-2,34 \cdot 10^{-2}$ | 0,74 | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| | $\cos\varphi$ | 0,84 | $1,83 \cdot 10^{-3}$ | $5,87 \cdot 10^{-2}$ | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $-3,2 \cdot 10^{-2}$ | $-1,25 \cdot 10^{-3}$ |

В однофазному виконанні при чисто активному навантаженні серед усіх схем ІСП кращі питомі потужності реактивних елементів – реакторів та конденсаторів має мостовий ІСП, виконаний за схемою *М1* (рис. 2 д). У схемі *М1* сума потужностей конденсаторів $C1$, $C2$ дорівнює $\hat{q}_{C\Sigma} = 1,04$, що на 0,79 в.о. менше, ніж у ІСП *Π1-LC*. Ця схема має меншу потужність реакторів $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,39$, що на 0,12 в.о. менша у порівнянні

із схемою *T1-LCL*, де $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$ в.о. Переваги схеми *M1* за питомими потужностями $\hat{q}_{L\Sigma}$, $\hat{q}_{C\Sigma}$ нівелюються в зв'язку із значно гіршим $\cos \varphi = 0,748 \div 0,839$ та абсолютно неприпустимим значенням $THD_I > 40\%$. Хоча схема *M1* має таку ж струмову характеристику як і інші *ІСП*, проте для забезпечення електромагнітної сумісності мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром з мережею живлення її застосовувати недоцільно. Таким чином, для живлення мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням виявлено найкращий з позицій забезпечення електромагнітної сумісності *ІСП* за схемою *T1-LCL*. Отримані вирази (формула 1, таблиця 5) та графічні залежності питомих потужностей від опору навантаження та ємності фільтра дозволяють оптимізувати елементи *ІСП* за мінімальними встановленими потужностями.

У додатках наведено перелік публікацій автора за темою дисертації та акти впровадження і використання результатів роботи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу розвитку принципів побудови, вдосконалення структур та оптимізації елементів силових фільтрів, спрямованих на забезпечення електромагнітної сумісності однофазних мостових випрямлячів з активним навантаженням та ємнісним фільтром у системах обмеженої потужності.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі проведеного аналізу існуючого стану досліджень питань покращення електромагнітної сумісності однофазних мостових випрямлячів з активним навантаженням та ємнісним фільтром у системах децентралізованого електропостачання обґрунтовано доцільність розвитку принципів побудови силових фільтрів для забезпечення електромагнітної сумісності таких випрямлячів з мережею живлення обмеженої потужності. Обрано базові структури пасивних та активних фільтрів гармонік струму для покращення показників електромагнітної сумісності. Для вирішення задач з пошуку оптимальних варіантів забезпечення електромагнітної сумісності мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням у *СЕП* з обмеженою потужністю розроблено імітаційні моделі та експериментальні макети силових структур.

2. На основі теорії планування цілеспрямованих експериментів побудовано ортогональний план другого порядку, визначено функції цілі та фактори, що впливають на електромагнітні процеси в системі «мережа живлення – силовий фільтр – однофазний мостовий випрямляч – ємнісний фільтр – активне навантаження». Проведено ряд експериментів на потужності навантаження, меншої відносно номінальної (до 10 кВт), з представленням результатів у вигляді математичних моделей для всіх структур силових фільтрів, які було обрано для дослідження в даній роботі.

3. Методом ортогонального плану другого порядку встановлено, що при потужності навантаження, меншої відносно номінальної (до 10 кВт), зростання ємності фільтра на виході мостового випрямляча та опору навантаження призводить до зменшення THD_I (від 19% до 8%) в *АКФС*, проте є значення ємності фільтра, при якому THD_I фактично не змінюється при зміні опору навантаження.

4. Методом ортогонального плану другого порядку встановлено залежність THD_I

ЛМС-фільтра від зміни величин ємності фільтра та опору навантаження на потужностях, менших за номінальну, з якої видно, що рівень THD_I має значення в межах 18-22% при $U_n=300\pm 10\% B$, тому для поліпшення рівня електромагнітної сумісності доцільно застосовувати такий фільтр як пасивний вузол в структурі гібридного фільтра.

5. Шляхом імітаційного моделювання встановлено, що введення в широкосмуговий *ЛМС*-фільтр додаткової обмотки, що включається узгоджено з основною, дозволяє позбутися комутаційного сплеску в струмі споживання випрямної установки і, таким чином, зменшити частоту модуляції *АКФС*, що працює разом із зазначеним *ЛМС*-фільтром у складі гібридного пристрою.

6. Проведено дослідження різних матеріалів осердь за питомими втратами в міді та в осердях, а також їх вартості. Проведено оптимізацію силового *L* та лінійного *L1* реакторів *АКФС*, внаслідок якої виявлено оптимальний варіант реактора *L1* з осердям з електротехнічної сталі *E360A* з товщиною стрічки 0,08 мм, яке має приблизно таку ж вартість, як феритове осердя, але меншу вагу. Наведено рекомендації для вибору варіантів реалізації силового реактора *L АКФС*.

7. Запропоновано алгоритм керування силовими ключами *АКФС*, використання якого дозволяє формувати сигнал, що визначає форму струму *АКФС*, який здійснюється шляхом вмикання пари силових ключів по діагоналі мостового перетворювача на інтервалі накопичення енергії та вмикання пари силових ключів нижньої групи на інтервалі віддачі, що дозволяє зменшити частоту імпульсної модуляції струму в силовому реакторі *АКФС*, кількість керованих напівпровідникових елементів та втрати при їх комутації.

8. Шляхом імітаційного моделювання встановлено нові залежності величини номінального струму силового реактора активного коректора форми струму (*АКФС*), який функціонує у комплексі з лінійним реактором (Z_D^*) на вході мостового випрямляча, від внутрішнього опору короткого замикання мережі живлення (Z_{K3}^*) при заданому значенні $THD_I < 3\%$, у вигляді поверхонь $I_{A\Phi}^* = f(Z_{K3}^*, Z_D^*)$ та $THD_U = f(Z_{K3}^*, Z_D^*)$, що дало змогу оптимізувати елементи коректора за показниками встановленої потужності за умови забезпечення заданого значення $THD_U < 8\%$.

9. На основі проведених досліджень описано основні фактори, що впливають на ціноутворення і оптимізацію реактивних та напівпровідникових елементів *АКФС* та встановлено суттєвий вплив співвідношення між реактивностями короткого замикання мережі і лінійного реактора гібридного фільтра на його ефективність і вартість. Вперше встановлено оптимальні співвідношення вартості елементів структури на основі *АКФС* та *ЛМС*-фільтра в залежності від заданої величини $THD_I (< 3\%)$ та спектру споживаного з мережі струму на вході зазначеного фільтра, при цьому за рахунок введення пасивних елементів фільтра досягається зниження встановленої потужності активного коректора.

10. Вперше проведено параметричну оптимізацію пасивних фільтрів з властивостями джерела струму на основі *ІСП* на вході мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням шляхом визначення впливу такої системи на величини встановлених потужностей реактивних елементів. Встановлено, що одночасно забезпечують виконання функцій фільтрів гармонік струму та джерел струму при

активному навантаженні випрямляча з ємнісним фільтром лише ІСП за схемами $\Gamma I-LC$ і $\Gamma I-LCL$, а за показниками сумісності та величинами встановлених потужностей реактивних елементів кращим визначено ІСП за схемою $\Gamma I-LCL$ ($\cos\varphi = 0,95 \div 0,99$, $THD_1 < 3\%$, $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$ в.о.).

11. Результати, які отримано за допомогою імітаційних моделей, перевірено на відповідність з експериментальними даними та встановлено розбіжність менше 5%, що свідчить про їх адекватність та можливість використання для подальших досліджень при інших значеннях активного навантаження мостового випрямляча з ємнісним фільтром.

12. Результати роботи рекомендовано для подальшого впровадження на підприємствах електротехнічного профілю Міністерства промислової політики України.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Визначення коефіцієнтів перетворення струмопараметричного мостового однофазного випрямляча з паралельним активно-ємнісним навантаженням/ Спірін В.М., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С.43-48.

2. Оптимізація індуктивно-ємнісного перетворювача з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням за питомими потужностями електромагнітних елементів/ Спірін В.М., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. *Технічна електродинаміка*. 2019. №6. С.25–29.

3. Якісні характеристики однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром при живленні від джерела струму/ Спірін В.М., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В., Салко С.В. *Технічна електродинаміка*. 2020. №2. С.23–27.

4. Волков І.В., Подольний С.В., Маруня Ю.В. Порівняльний аналіз пасивних, активних та гібридних фільтрів гармонік струму для частотно-регульованого електроприводу. *Технічна електродинаміка*. 2020. №3. С.40–45.

5. Сравнительный анализ Γ -образных индуктивно-емкостных преобразователей CL -вида по установленной мощности реактивных элементов/ Спірін В.М., Кабан В.П., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В. Матвеев В.Ю. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2015. Вип.42. С. 101-104

6. Дослідження роботи активного коректора форми струму при малій потужності навантаження/ Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип.43. С. 96-101.

7. Дослідження роботи пасивного LMC-фільтра при малій потужності навантаження/ Спірін В.М., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 46. С. 81-84.

8. Покращення електромагнітної сумісності однофазного мостового випрямляча з паралельним активно-ємнісним навантаженням/ Спірін В.М., Губаревич В.Н., Маруня Ю.В., Салко С. В. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип.50. С. 83-87.

9. Маруня Ю.В. Однофазний гібридний фільтр на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 55. С. 11-15.

10. Оптимізація елементів активного коректора форми струму у складі гібридного фільтра алгоритмами переключення транзисторів інвертора/ Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. *Технічна електродинаміка*. 2020. №6. С.21–24. /за матеріалами міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної електротехніки», м.Київ, 2020 р.

11. Оптимізація електромагнітних вузлів –реакторів з різними матеріалами осердь для активних коректорів форми струму/ Спірін В.М., Комаров М.С., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. №4. С.71-74. /за матеріалами міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка і енергоефективність», м. Одеса, 2016 р.

12. Губаревич В.Н., Маруня Ю.В. Однофазний широкополосний *ЛМС*-фільтр на вході випрямителя с емкостной нагрузкой. *Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут"*. 2015. Вип. 12 (1121). С. 398-401. /за матеріалами міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка і енергоефективність», м. Харків, 2015 р.

13. Волков И.В., Маруня Ю.В. Однофазно-трехфазные фильтры гармоник тока. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. №8 (114). С. 241-243. /за матеріалами міжнародної науково-технічної конференції «Силовая электроника і енергоефективність», м. Алушта, 2013 р.

14. Маруня Ю.В. Моделювання індуктивно-ємнісного перетворювача з однофазним мостовим випрямлячем, активним навантаженням та ємнісним фільтром. *Зб. тез XXXVIII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, м. Київ, 15 травня 2020 р. / ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2020. С. 48-51.

АНОТАЦІЇ

Маруня Ю.В. Силові гібридні фільтрів для систем децентралізованого електропостачання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021 р.

В роботі вирішується актуальна наукова задача розвитку принципів побудови, вдосконалення структур та оптимізації елементів силових фільтрів, спрямованих на забезпечення електромагнітної сумісності однофазних мостових випрямлячів з активним навантаженням та ємнісним фільтром у системах обмеженої потужності.

У дисертації до розгляду прийнято підхід, за яким силовий фільтр під'єднується до входу мостового випрямляча, що споживає нелінійний струм. Обрано структури на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів для побудови пасивних фільтрів з властивостями джерела струму, а також широкосмугового *ЛМС*-фільтра та активного коректора форми струму, що можуть функціонувати як окремо, так і у складі гібридної структури. Для цих структур вирішено багатофакторні задачі параметричної оптимізації, що дало змогу забезпечити заданий рівень електромагнітної сумісності мережі живлення та нелінійних навантажень за умови мінімальних вартості та встановленої потужності силових фільтрів.

Проведено параметричну оптимізацію пасивних фільтрів на основі індуктивно-

емнісних перетворювачів при активному навантаженні та згладжуючому пульсації ємнісному фільтрі випрямляча шляхом визначення впливу такого навантаження на величини встановлених потужностей реактивних елементів, що дало змогу виявити найкращий з позицій електромагнітної сумісності перетворювач за схемою *TI-LCL*.

Встановлено нові залежності величини номінального струму силового реактора активного коректора форми струму (*АКФС*), який функціонує у комплексі з лінійним реактором на вході мостового випрямляча, від внутрішнього опору короткого замикання мережі живлення при заданому значенні $THD_I < 3\%$, що дало змогу оптимізувати елементи коректора за показниками встановленої потужності за умови забезпечення заданого значення $THD_U < 8\%$. Встановлено оптимальні співвідношення вартості елементів структури на основі активного коректора та *LMC*-фільтра з урахуванням заданої величини THD_I та спектру споживаного з мережі струму на вході зазначеного фільтра, при цьому за рахунок введення пасивних елементів фільтра досягається зниження встановленої потужності активного коректора відносно загальної потужності нелінійного споживача.

Розвинуто метод керування силовими ключами активного коректора шляхом вмикання пари силових ключів по діагоналі мостового перетворювача на інтервалі накопичення енергії та вмикання пари силових ключів нижньої групи на інтервалі віддачі, що дозволяє зменшити частоту імпульсної модуляції струму в реакторі *АКФС*, кількість керованих напівпровідникових елементів та втрати при їх комутації.

Розроблено рекомендації для раціонального вибору структур та розрахунків силових фільтрів для забезпечення електромагнітної сумісності нелінійних навантажень.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, системи електропостачання обмеженої потужності, гібридний фільтр, активний коректор форми струму, мостовий випрямляч, широкосмуговий *LMC*-фільтр.

Marunia Yu.V. The power hybrid filters for decentralized power supply systems.
– Manuscript.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.09.12 – semiconductor converters of the electric power. – Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2021

In the dissertation solves the actual scientific task of developing the principles of construction, improvement of structures and optimization of power filter elements aimed at ensuring electromagnetic compatibility of single-phase bridge rectifiers with active load and capacitive filter in systems of limited power.

In the dissertation considers an approach in which the power filter is connected to the input of a bridge rectifier that consumes nonlinear current. It was considered the structures which based on inductive-capacitive converters for the construction of passive filters with the properties of the current source, as well as a broadband *LMC*-filter and active current shape corrector, which can operate both separately and as parts of a hybrid structure. For these structures, multifactor parametric optimization problems were solved, which made it possible to ensure a given level of electromagnetic compatibility of the power supply network and nonlinear loads under conditions of minimum cost and installed power of power filters.

Parametric optimization of passive filters based on inductive-capacitive converters under active load and pulsation smoothing rectifier filter was performed by determining the effect of such a load on the values of the installed power of reactive elements, which allowed to identify the best converter according to the scheme *TI-LCL* from the position of electromagnetic compatibility.

There was determined the new dependences of the rated current of the power reactor of the active corrector, which operates in combination with the linear reactor at the input of the bridge rectifier, from the internal short-circuit resistance of the power supply network at a given value $THD_I < 3\%$, which made it possible to optimize the corrector elements according to the indicators of the installed power, provided that the set value $THD_U < 8\%$. The optimal ratio of the cost of elements of the structure based on the active current shape corrector and broadband *LMC*-filter was determined, taking into account the specified value of THD_I and the spectrum of current consumed from the network at the input of the specified filter, and at the same time due to introduction of passive elements of the filter reduction of the installed power of the active corrector concerning the general power of the nonlinear consumer was reached. It was performed a method for controlling the power switches of the active corrector by turning on a pair of power switches on the diagonal of the bridge converter in the interval of energy storage and turning on a pair of power switches of the lower group on the interval of recoil, which allows to reduce the frequency of pulsed current modulation in the reactor of active corrector, the number of controlled semiconductor elements and losses during their switching. Recommendations for rational choice of structures and calculations of power filters to ensure electromagnetic compatibility of nonlinear loads are developed in this work.

Keywords: electromagnetic compatibility, power supply systems of limited power, hybrid filter, active current shape corrector, bridge rectifier, broadband *LMC*-filter.