

## **Відгук**

офіційного опонента, доцента кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" кандидата технічних наук, доцента Бондаренка Олександра Федоровича, на дисертаційну роботу Маруні Юлії Василівни «Силові гібридні фільтри для систем децентралізованого електропостачання», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

### **Обґрунтування вибору теми дисертаційної роботи**

Велика кількість як промислових так і побутових електротехнічних пристроїв здійснюють живлення свого навантаження від мостових випрямлячів з ємнісним фільтром. При цьому споживається несинусоїдний струм, що негативно відбивається на параметрах якості електроенергії, а таке навантаження виступає в ролі потужного нелінійного навантаження для систем електропостачання (СЕР). В СЕР з обмеженою потужністю дуже важливим є дотримання нормованого рівня параметрів якості електричної енергії, тому обов'язковою стає електромагнітна сумісність мостових випрямлячів з децентралізованими СЕР. Відомі технічні рішення базуються на використанні пасивних або активних фільтрів. Створення спеціальних пристроїв, що забезпечують узгодження мостових випрямлячів з навантаженням та мережі живлення обмеженої потужності, потребує вирішення оптимізаційної задачі – вибору структур пасивних чи активних фільтрів, за умови отримання прийнятних параметрів та характеристик елементів для практичної реалізації. Вирішення такої задачі можливе шляхом формування гібридних структур, що складаються з пасивних фільтрів та активних коректорів форми струму (АКФС), які встановлюються на вході мостового випрямляча з ємнісним фільтром чи навіть на вході групи таких споживачів. При цьому необхідно оптимізувати співвідношення внесків дії пасивного та активного фільтрів на параметри якості електроенергії.

Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України «Енергетика та енергоефективність». Її підготовлено в Інституті електродинаміки НАН України в рамках виконання науково-дослідних робіт за темами «Розвиток теорії та створення засобів забезпечення електромагнітної сумісності споживачів в системах децентралізованої генерації електроенергії «Децентралізація» № 0111U009251 та «Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот «Розплав» № 0117U002584.

Зважаючи на викладене вище, тема дисертаційної роботи, безумовно, є актуальною.

## **Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Маруні Ю.В. має такі основні структурні елементи: титульний аркуш; анотація; зміст; перелік умовних позначень; вступ; чотири розділи; висновки; список використаних джерел; додатки. Загальний обсяг роботи складає 174 сторінки, у тому числі 136 сторінок основного тексту, 67 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел з 139 найменувань і 2 додатки.

**У вступі** обґрунтовано вибір теми дисертаційної 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** проведено огляд і аналіз шляхів 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. Було виділено і окремо проаналізовано схеми однофазного широкосмугового ЛМС-фільтру на вході випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром, однофазно- трифазних фільтрів гармонік на вході випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром, силових активних фільтрів на вході випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром. Визначено умови та принципи побудови силових гібридних фільтрів в системах обмеженої потужності, а також відзначено, що основними елементами фільтрів, що визначають їх вартість, втрати потужності та масогабаритні показники є силові ключі і реактивні елементи (дроселі і конденсатори). На основі матеріалів розділу були сформульовані задачі дисертаційної роботи.

**У другому розділі** на основі теорії планування експерименту досліджено режими роботи ЛМС-фільтра та АКФС з урахуванням можливих змін навантаження на виході випрямляча, а також проведено оптимізацію елементів цих силових фільтрів. Було встановлено, що при відносно малій потужності навантаження та обмеженому діапазоні її зміни у АКФС, зростання ємності фільтра призводить до зменшення коефіцієнта гармонік спотворення струму. При цьому відхилення напруги живлення несуттєво впливає на коефіцієнт гармонік струму, а зменшення опору навантаження призводить до зменшення діапазону зміни  $THD_I$  при збільшенні ємності фільтра. Встановлено значення ємності фільтра за якого коефіцієнт гармонік струму фактично не змінюється при зміні опору навантаження. Також, встановлено, що при використанні ЛМС-фільтру зміна величин ємності фільтра та опору навантаження слабо впливає на зміну показників  $THD_I$  для потужностей, які є меншими за номінальну. Подальші дослідження показали, що введення у широкосмуговий ЛМС-фільтр додаткової обмотки, яка включена узгоджено з основною, дозволяє позбутися комутаційного

сплеску в струмі, що споживається випрямлячем і може призводити до зменшення частоти модуляції АКФС. Досліджено різноманітні матеріалів осердя за питомими втратами в міді та в осердях, а також їх вартістю. Для силового  $L$  та лінійного  $L1$  реакторів АКФС визначено оптимальний варіант реактора  $L1$  з осердям для конкретної марки і товщини стрічки електротехнічної сталі (ЕЗ60А, 0,08 мм), який має співмірну із феритовим осердям вартість але меншу вагу. Розроблено рекомендації для вибору варіантів реалізації силового реактора  $L$  АКФС.

**У третьому розділі** шляхом використання імітаційного моделювання було досліджено однофазні та трифазні гібридні фільтри на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Проведено оптимізацію елементів АКФС у складі гібридної структури. Окремо необхідно відзначити, що ці задачі було виконано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Omega 2010, яке розроблено в Інституті електродинаміки НАН України. Встановлено, що використання ЛМС-фільтра в структурі ГФ на вході однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром, в більшості випадків забезпечує показники  $THD_i$ , які є кращими за нормативні. В результаті було зменшено діюче значення струму активного фільтра в 4 рази, а амплітудного – в 5 разів у порівнянні з використанням в такій структурі 3% реактора. Запропоновано алгоритм керування силовими ключами АКФС, використання якого дозволяє формувати сигнал, що визначає форму струму АКФС та дозволяє зменшити частоту імпульсної модуляції струму в силовому реакторі АКФС, кількість керованих напівпровідникових елементів та втрати при їх комутації. 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 показника  $THD_i < 3\%$  та оптимізовано елементи коректора за показниками встановленої потужності за умови забезпечення заданого значення  $THD_U < 8\%$ . Окрім того було визначено оптимальні співвідношення вартості елементів структури на основі АКФС та ЛМС-фільтра з урахуванням заданої величини  $THD_i$  та спектру струму, що споживається з мережі, на вході зазначеного фільтра.

**У четвертому розділі** досліджено електромагнітні процеси в однофазному мостовому випрямлячі з ємнісним фільтром та активним навантаженням при живленні безпосередньо від індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), який одночасно виконує функції фільтра та джерела струму. В таких струмопараметричних випрямлячах формування вихідної струмової характеристики виконується за рахунок резонансного налагодження параметрів реактивних елементів перетворювача. Досліджено електромагнітні процеси в цьому перетворювачі з Г-, Т- та М-подібними схемами ІЄП за ортогональним планом другого порядку згідно теорії планування експерименту. В результаті проведеного порівняльного

аналізу Г-подібних ІЄП встановлено, що найбільший практичний інтерес, серед схем подібної конфігурації, має схема Г1-ЛС. Визначено, що встановлена відносна потужність реактора такого ІЄП залишається незмінною при повній зміні аргументу навантаження. Водночас, встановлена відносна потужність конденсаторної батареї зі збільшенням індуктивного характеру навантаження зростає, а зі збільшенням ємнісного характеру навантаження зменшується до нуля, що відповідає включенню паралельно індуктивності ІЄП за схемою Г1-СЛ конденсатора на резонансній частоті. Дослідження електромагнітних процесів в системі ІЄП за схемою Г1-СЛ – однофазний мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром показало, що ця система має хорошу електромагнітну сумісність з мережею живлення, показник  $THD_I < 6\%$ , а навантажувальна характеристика має лінійний характер для робочого діапазону навантаження. Визначено коефіцієнти перетворення за напругою та струмом однофазного мостового випрямляча при живленні від ІЄП, який виконано за схемою Г1-ЛС, що дозволило виконати розрахунок однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром. Окрім того, було визначено оптимальний відносний опір навантаження ІЄП по схемі Г1-ЛС, який забезпечує мінімум питомої потужності реактора ІЄП. Також, було встановлено, що в якості джерела струму для однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром, краще використовувати ІЄП за схемою Т1-ЛСЛ, яка в порівнянні з аналогічним випрямлячем з ІЄП за схемою Г1-ЛС має кращі показники електромагнітної сумісності, менші значення потужності реакторів L1 та L2. Зроблено висновок про те, що одночасно забезпечують виконання функцій фільтрів та джерел струму при активному навантаженні випрямляча з ємнісним фільтром лише ІЄП за схемами Г1-ЛС і Т1-ЛСЛ.

**У додатках** наведено список публікацій здобувача за темою дисертації та акти про впровадження і використання результатів дисертаційної роботи.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше проведено параметричну оптимізацію пасивних фільтрів з властивостями джерела струму на основі ІЄП 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 ІЄП за схемою Т1-ЛСЛ.

2. Вперше визначено 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  $THD_U < 8\%$ .

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

4. 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.

### **Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, обґрунтовані належним чином. Такий висновок можна зробити, зважаючи на змістовний огляд науково-технічної літератури за темою дисертації, використання сучасних методів дослідження, ретельне проведення імітаційного моделювання в Micro-Cap 10, спеціалізованому ПЗ Omega 2010 і натурних експериментів, порівняння отриманих результатів з результатами фізичних експериментів та їх критичний аналіз. Отримані в дисертації результати, висновки та рекомендації є логічно і математично аргументованими. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату з урахуванням факторів та явищ, які мають місце в реальних перетворювачах електричної енергії для систем електропостачання з обмеженою потужністю.

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

### **Практичне значення отриманих результатів**

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.

Проведено параметричну оптимізацію реакторів АКФС, в результаті якої розроблено 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 Е 360А з товщиною стрічки 0,08 мм, що має приблизно однакову вартість з феритовим осердям, але меншу вагу.

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

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 ЛМС-фільтр з  $THD_I = 12\%$ .

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

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на декількох конференціях як міжнародного так і всеукраїнського рівня, зокрема: міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка і енергоефективність» (Алушта, 2013 р.; Харків, 2015 р.; Одеса, 2016 р.); «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.).

### **Оцінка ступеню опублікування наукових результатів**

Основний зміст дисертації викладено в 14 наукових працях, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 5 публікацій проіндексовано в міжнародній наукомеричній базі Scopus. Опубліковано матеріали доповідей на 5 науково-технічних конференціях.

### **Оцінка мови, стилю, оформлення дисертації**

Дисертаційна робота має внутрішню єдність та логіку. Мова і стиль дисертації та автореферату в цілому задовільні та відповідають вимогам стандартів оформлення науково-дослідних робіт. Зміст автореферату відповідає змісту дисертації та об'єктивно висвітлює основні результати роботи.

Обсяг і структура дисертації відповідають вимогам та рекомендаціям атестаційного органу України.

## **Зауваження до роботи**

1. Формулювання об'єкту і предмету дослідження не відповідають існуючим рекомендаціям, згідно з якими: «*Об'єкт дослідження* – це процес або явище, що породжує проблемну ситуацію й обране для дослідження. *Предмет дослідження* міститься в межах об'єкта. Об'єкт і предмет дослідження як категорії наукового процесу співвідносяться між собою як загальне і часткове. В об'єкті виділяється та його частина, яка є предметом дослідження. Саме на нього спрямована основна увага дисертанта, оскільки предмет дослідження визначає тему (назву) дисертаційної роботи» (Бюлетень ВАК України, № 9-10, 2011, Вимоги до оформлення дисертацій та авторефератів дисертацій).

2. Пункт 1 наукової новизни сформульовано таким чином, що він повторює загальний результат дисертаційної роботи. Не дотримано вимог до формулювання пунктів наукової новизни, тобто немає конструкції – що зроблено з визначенням ступеню новизни, за рахунок чого це зроблено, і що це дозволило отримати.

3. Пункт 12 загальних висновків містить некоректну інформацію – Міністерство промислової політики України (Мінпромполітики) – колишнє міністерство України. Реорганізовано 23 березня 2014 року шляхом приєднання до Міністерства економічного розвитку і торгівлі відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 23 березня 2014 р. № 94 «Про реорганізацію Міністерства промислової політики».

4. В оглядовій частині дисертаційної роботи і списку використаних джерел не представлено результати патентного пошуку, що ускладнює оцінку поточного рівня розвитку області техніки, яка досліджується.

5. За текстом дисертаційної роботи зустрічається некоректне використання терміну «коефіцієнт гармонік струму  $THD_i$  (Total Harmonic Distortion)» у різних варіаціях – «коефіцієнт гармонік спотворення струму», «коефіцієнт спотворення гармонік струму», хоча на стор. 29 було подано коректне визначення цього терміну з відповідними посиланнями.

6. За текстом дисертаційної роботи зустрічається некоректне використання назви теорії планування експерименту, а саме використано назву «теорія планування цілеспрямованих експериментів», яка має в собі протиріччя, адже експеримент за визначенням є цілеспрямованим впливом на об'єкт дослідження з метою отримання достовірної інформації.

7. В тексті дисертації та автореферату некоректно визначено обсяг основного тексту дисертації (154 сторінки друкованого тексту). З огляду на п. 7 розділу III. Вимоги до структурних елементів (Вимоги до оформлення дисертації, які затверджено наказом Міністерства освіти і науки України 12.01.2017 № 40), основна частина дисертації має обсяг 136 сторінок.

8. За текстом дисертації та автореферату зустрічаються несуттєві орфографічні, синтаксичні та стилістичні помилки.

Треба відмітити, що наведені зауваження та недоліки не є принциповими і не впливають на кінцеву оцінку дисертаційної роботи.

## Висновок

За результатами розгляду дисертаційної роботи можна зробити такі висновки.

1. Дисертаційна робота в цілому є самостійно виконаним завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Вона містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-практичну задачу розвитку принципів побудови, вдосконалення структур та оптимізації елементів силових фільтрів, спрямованих на забезпечення електромагнітної сумісності випрямлячів у системах обмеженої потужності.

2. Дисертація відповідає спеціальності 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. Основні наукові положення дисертації досить повно та об'єктивно викладені у публікаціях та авторефераті.

3. За своїм змістом і науковим рівнем дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, що висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата наук (пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» від 24 липня 2013 р., Постанова Кабінету Міністрів України № 567 зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015 та № 567 від 27.07.2016), а її авторка – Маруня Юлія Василівна – заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Офіційний опонент, доцент кафедри  
електронних пристроїв та систем  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
кандидат технічних наук, доцент

