

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

Козлова Максима Олеговича

на тему «Зниження високочастотних кондуктивних

електромагнітних завад в пропульсивних електроустановках суден

з частотно-регульованими асинхронними електроприводами»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми та її зв'язок з науковими програмами. Використання частотно-регульованих асинхронних електроприводів за найбільш розповсюдженою схемою «трифазна мережа – некерований випрямляч – автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором» у складі суднових пропульсивних електроустановок обумовлено їх високими енергетичними показниками та здатністю гнучко керувати тягою гребного гвинта при маневруванні та русі судна. Така структура поряд з частотою комутації вентилів АІН від 2 до 20 кГц забезпечує високий ККД та необхідний для пропульсивних установок діапазон регулювання швидкості та моменту двигуна. Однак, вадою таких структур є виникнення в них синфазних і диференційних складових високочастотних електромагнітних завад у складі напруги і струму як в точках приєднання двигуна, так і в точках живлення від мережі. Синфазні складові обумовлено паразитними ємностями фаза–корпус та високочастотними гармоніками на частоті комутації інвертора та кратних їй, що може впливати на функціонування електронного обладнання та автоматики, а диференційних складові виникають із-за швидкої зміни напруги на виході інвертора і обумовлюють імпульсні перенапруги на вході гребних асинхронних двигунів, викликають термічне старіння та пробої ізоляції обмоток статора та кабельних ліній. Тобто наявність диференційних і синфазних перешкод може стати причиною аварійних ситуацій, збільшувати економічні та технологічні збитки при експлуатації суднового електрообладнання.

З названих причин зниження диференційної та синфазної складових високочастотних електромагнітних завад в судових системах з пропульсивними електроустановками на базі частотно-регульованих асинхронних електроприводів засобами комбінованих високочастотних пасивних фільтрів є важливою науково-прикладною проблемою, а рішення задач, що сприяють її вирішенню, є актуальними.

Наукова новизна одержаних результатів, на мій погляд, полягає у наступному:

1. Отримала подальший розвиток імітаційна модель пропульсивного частотно-регульованого асинхронного електропривода за рахунок уточнення моделей його складових з урахуванням кабельних з'єднань та паразитних міжвиткових ємностей та ємностей «фаза-корпус» елементів електрообладнання, яка, на відміну від існуючих, надає можливість достовірно оцінювати характер і рівні диференційних та синфазних високочастотних складових електромагнітних завад в напрузі і струмах вхідних та вихідних кіл перетворювачів частоти для діапазонів 2.5–125 кГц, 1–60 МГц.

2. Удосконалено аналітичні вирази для розрахунку параметрів еквівалентної схеми обмотки статора частотно-регульованого асинхронного двигуна за рахунок використання в них експериментально-встановлених базисних значень повного опору обмотки та його переважного характеру (індуктивний або ємнісний) на характерних частотах (в т.ч. резонансних), які, на відміну від попередніх, частково спираються на експериментальні частотні залежності повного опору обмотки двигуна.

3. Вперше запропоновано структуру комбінованого пасивного фільтра для ефективного зниження високочастотних електромагнітних завад в колах частотно-регульованих асинхронних електроприводів, що містить чотириобмотковий синфазний трансформатор та трифазний диференційний RLC-фільтр з підключенням первинної обмотки трансформатора до точки загального з'єднання

RC-ланок диференційного фільтра, що, на відміну від попередніх, дозволяє одночасно знижувати синфазні і диференційні складові завад.

4. Вперше розроблено математичну модель комбінованого пасивного фільтра з застосуванням еквівалентних перетворень за теоремою Тевеніна і теорії двополюсників, що надало можливість отримати кінцеві вирази передавальних функцій комбінованого фільтра відповідно за синфазною і диференційною складовими напруги та аналітично визначати параметри фільтра для забезпечення його максимальній ефективності, і, на відміну від існуючих моделей, дозволило розраховувати умови компенсації як диференційних, так і синфазних складових електромагнітних завад.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та достовірність результатів. Отримані автором наукові результати у відповідності до поставлених задач досліджень є логічними, не суперечать фундаментальним положенням фізики, математики, теоретичних основ електротехніки та фундаментальним методам досліджень електромагнітних процесів. Обґрунтованість сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій досягнуто за допомогою коректного використання загально-відомих теоретичних методів і достовірного експериментального дослідження, а саме: перетворення Лапласа, теореми Тевеніна, теорії двополюсників, розкладання у комплексну форму ряду Фур'є, методу транспозиції, детального плану експерименту. Одержані в роботі теоретичні положення та результати розрахунків перевірено і підтверджено шляхом фізичного експерименту та імітаційного моделювання в MATLAB. Зважаючи на кількість публікацій у наукометричних і фахових виданнях, які відображають результати роботи, достовірність дисертаційного дослідження не викликає сумнівів.

Практична цінність результатів роботи полягає в наступному:

1. Результати дисертаційного дослідження використано в держбюджетній науково-технічній (експериментальній) розробці «Розробка засобів суднових

систем генерації та перетворення електроенергії для підвищення енергоефективності та поліпшення електромагнітної сумісності» (№ ДР 0121U112133, 12.2022).

2. Розроблено модель комбінованого пасивного фільтра і перевірено його ефективність в середовищі MATLAB/Simulink на основі уточненої імітаційної моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода, який забезпечує зниження рівня синфазної напруги на 93 % на виході та 62,5 % на вході перетворювача, а також забезпечує зменшення гармонічних спотворень напруги з 88,62 % до 6,07 % та з 4,93 % до 4,18 % відповідно.

3. Удосконалено методику визначення власних і паразитних параметрів силових кабельних ліній у складі пропульсивних частотно-регульованих асинхронних електроприводів між джерелом живлення і перетворювачем частоти, а також між перетворювачем і асинхронним двигуном з урахуванням конструкційних особливостей кабелів (кількості жил та екранування) та способу прокладання.

4. Запропоновано методику експериментального дослідження гармонічних спотворень до 125 кГц з використанням цифрового осцилографу і засобів спектрального аналізу в MATLAB/Simulink, що, на відміну від стандартних аналізаторів якості електроенергії, обмежених 50-ю гармонікою, дозволяє забезпечити необхідну точність визначення повного коефіцієнта гармонічних спотворень напруги і струмів з урахуванням високочастотного діапазону (2.5–125 кГц) без застосування коштовних широкополосних аналізаторів-реєстраторів.

5. Розроблено методику аналітичного визначення диференційної напруги, як різниці між фазною та синфазною напругою, експериментально виміряними за допомогою двоканального цифрового осцилографа з подальшою обробкою даних у MATLAB Simulink.

Основні положення, що викладено в дисертаційній роботі, використовуються у навчальному процесі НУК ім. адм. Макарова при підготовці магістрів у галузі знань «Електрична інженерія» (шифр галузі 14) за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (код спеціальності 141)

згідно робочої навчальної програми обов'язкової професійної компоненти ОК6 (код РПНД Т8216) «Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в електроенергетичних системах» освітньо-наукової програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Розроблені в дисертаційній роботі методи і моделі впроваджено на підприємствах ТОВ «НВП ІНТЕР ЕЛЕКТРО» та «Електрім – 2000», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань та 3 додатків. Повний обсяг дисертації з анотацією становить 213 сторінок друкованого тексту, основна частина викладена на 160 сторінках. Дисертація містить 77 рисунків та 11 таблиць.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність і значущість роботи.

У вступі обґрунтовується актуальність, розглянуто зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету, завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, викладено основні наукові положення, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про особистий внесок здобувача і апробацію роботи.

У першому розділі, на підставі аналізу структур і режимів роботи суднових пропульсивних установок з частотно-регульованими асинхронними електроприводами встановлено, що робота таких електроприводів супроводжується генерацією широкого спектра високочастотних електромагнітних завад і основними джерелами високочастотних завад є синфазні

струми і напруги, що вимагає поглибленого дослідження механізмів їх виникнення та розповсюдження, з подальшою розробкою ефективних засобів їх зниження.

У другому розділі, для раніше відомої еквівалентної схеми фазної обмотки статора асинхронного двигуна враховано паразитні міжвиткових ємності і ємності «фаза-корпус», що надає змогу досліджень у розширеному частотному діапазоні (40 Гц...60 МГц) синфазних і диференційних складових електромагнітних завад, які виникають в обмотках двигуна при живленні від інвертора у складі частотно-регульованого асинхронного електропривода. Наведено методику визначення параметрів моделі за рахунок використання базисних величин повного опору обмоток двигуна на характерних частотах. Показано, що результати моделювання в MATLAB корелюються з експериментальними даними. Похибка не перевищує 5%, що свідчить про доцільність застосування запропонованої еквівалентної схеми для побудови уточненої моделі асинхронного двигуна, як складової частини моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода, призначеної для подальшого дослідження електромагнітних процесів у вхідних та вихідних колах перетворювача частоти. До повної моделі також додано власні паразитні параметри силових ключів, кабелів, що суттєво впливає на достовірність відтворення високочастотних синфазних та диференційних складових електромагнітних завад.

У третьому розділі проведено аналіз сучасних засобів і методів зниження електромагнітних завад у частотно-регульованих асинхронних електроприводах. Вперше запропоновано принцип побудови комбінованого трифазного пасивного фільтра за рахунок поєднання чотириобмоткового синфазного трансформатора і трифазного диференційного RLC-фільтра. Розроблено математичну модель запропонованого фільтра для визначення передавальних функцій за диференційною і синфазною напругою, що дозволяє кількісно оцінити його вплив на рівень електромагнітних завад. Визначено критерії вибору його основних параметрів: з урахуванням частоти комутації, імпедансу навантаження та магнітних властивостей синфазного трансформатора. Встановлено оптимальні

співвідношення між резонансною частотою фільтра та частотою комутації інвертора для досягнення максимальної ефективності зниження завад.

Четвертий розділ спрямований на експериментальні та імітаційні дослідження частотно-регульованого асинхронного електропривода з експериментальним визначенням гармонічного складу високочастотних електромагнітних перешкод в високочастотному діапазоні 2,5–125 кГц. Результати експериментальних досліджень порівняно з результатами імітаційного моделювання уточненої моделі електроприводу з та без запропонованого в 3-му розділі комбінованого пасивного фільтра. Це надало змогу довести ефективність фільтра для зниження диференційних та синфазних складових електромагнітних завад.

У висновках стисло охарактеризовано основні результати дисертаційного дослідження.

У додатках наведено акти впровадження результатів роботи, скрипти для обробки масивів експериментальних даних, а також фотоматеріали, на яких зафіксовано процес проведення експериментальних досліджень.

Повнота викладення в опублікованих працях.

Наукові результати, положення, висновки і рекомендації повністю відображено в опублікованих працях. За темою дисертації здобувачем опубліковано 10 наукових робіт, з них 2 роботи видано у закордонних журналах, занесених до міжнародних наукометричних баз (Scopus, квартал Q1), 1 робота (Scopus, квартал Q4), 1 робота опублікована у фаховому виданні України, 6 робіт в матеріалах конференцій (в т.ч. 1 в матеріалах конференцій, індексованих у Scopus).

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Структура дисертаційної роботи, одержані наукові та практичні результати в повній мірі відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора

філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами, внесеними постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024) та паспорту спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

До роботи є **зауваження**, проте вони ніяким чином суттєво не впливають на загальне позитивне враження від роботи.

1. В параграфі 1.5 надано велику кількість формул для розрахунків втрат від високочастотних завад, але в більшості випадків не наведено будь-яких результатів розрахунків, співвідношень з номінальною потужністю електропривода.

2. С. 50 – є протиріччя між анотацією та першим абзацом з визначення джерела синфазної напруги. Вказано, що швидкість наростання dU/dt обумовлює і диференційні і синфазні завади.

3. У розділі 2 надано чисельну кількість характеристик, параметрів асинхронного двигуна і частотно-регульованого електропривода, але немає паспортних характеристик, що не дає змогу порівняти розроблені автором моделі з типовими.

Рис. 2.13 не дає відповідь на це питання, так як його аналіз обмежується характеристиками «досить точно», «близькі до вимірюваних значень».

3. В той же час параграфи 2.3 і 2.4 обмежено тільки формулами без розрахунків і моделювання, що не дає можливості оцінити доцільність ускладнення моделей.

4. СС. 108–110 – відсутнє обґрунтування або посилання на нього переходу від схеми на рис. 3.6 до еквівалентної схеми на рис. 3.7 для аналізу синфазного режиму.

5. СС.120–121 – пп.1–3 висновків до розділу 3 не відносяться до власних досліджень автора і не вплинули на рішення задач дисертаційної роботи.

6. С.124 – в табл.4.1 наведено всі стандарти методів вимірювання. Доцільніше було б навести ті стандарти, яким відповідають використані прилади і якими користувався автор під час експериментальних досліджень.

7. Цифровий осцилограф SDS1102CMI має один АЦП і тому виконує послідовну вибірку даних. З опису скриптів не зрозуміло, чи враховує автор цю особливість пристрою для розрахунку диференційних складових.

8. С.172 – в табл. 4.5 невдало поєднано результати фізичних експериментів та імітаційного моделювання. З тексту 4-го розділу випливає, що диференційний і комбінований фільтри використовувались лише при імітаційному моделюванні.

Є декілька зауважень до перекладів з іноземної документації (рис. 1.1), використовуються різні версії термінології, як-то «передатна функція» і «передавальна функція», є граматичні помилки, найбільш неприємна з яких, це «експерЕмент», є дублювання у переліку використаних джерел, а саме [1] та [32], а також [35] та [49].

Однак, вважаю, що зазначені зауваження не стосуються основних положень та результатів дисертаційної роботи, не знижують її наукової та практичної цінності.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Козлова Максима Олеговича на тему «Зниження високочастотних кондуктивних електромагнітних завад в пропульсивних електроустановках суден з частотно-регульованими асинхронними електроприводами» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що в сукупності розв'язують актуальну науково-прикладну проблему зниження диференційної та синфазної складових високочастотних електромагнітних завад в суднових системах з пропульсивними електроустановками на базі частотно-регульованих асинхронних електроприводів з автономними ШІМ інверторами напруги засобами комбінованих високочастотних пасивних фільтрів.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, достовірність, наукову та практичну значимість отриманих результатів, а також повноту їх висвітлення в опублікованих працях, вважаю що представлена дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про

присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор, Козлов Максим Олегович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент

професор, доктор технічних наук

професор кафедри електричної інженерії та електроніки

Національного університету

“Одеська морська академія”

Віктор БУШЕР