

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

КОЗЛОВА МАКСИМА ОЛЕГОВИЧА

на тему «**Зниження високочастотних кондуктивних
електромагнітних завад в пропульсивних електроустановках суден
з частотно-регульованими асинхронними електроприводами**»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми виконаних досліджень, її зв'язок з державними науковими програмами.

Використання частотно-регульованих асинхронних електроприводів у складі суднових пропульсивних електроустановок обумовлено їх високими енергетичними показниками та здатністю гнучко керувати тягою гребного гвинта при маневруванні та русі судна. Основні корисні властивості пропульсивних електроустановок з частотно-регульованими асинхронними електроприводами забезпечуються використанням у їх складі перетворювачів частоти за найбільш розповсюдженою схемою, некерований випрямляч – автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією, як джерела живлення для гребних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Зазвичай структура таких перетворювачів частоти містить ємність у ланці постійного струму, а частота комутації вентилів АІН з ШІМ знаходиться в діапазоні від 2 до 20 кГц.

Однак поряд із зазначеними вище корисними властивостями, вадою таких структур є виникнення в них синфазних і диференціальних складових високочастотних електромагнітних завад у складі напруги і струму, як в точках приєднання двигуна так і в точках живлення від мережі.

Наявність диференціальних складових пов'язана з високими значеннями швидкості зміни напруги на виході інвертора, а синфазні складові обумовлені

ємностями фаза - корпус та високочастотними гармоніками кратними частоті комутації вентилів інвертора.

Диференційні завади обумовлюють імпульсні перенапруги на вході гребних асинхронних двигунів, які викликають термічне старіння та пошкодження ізоляції обмоток статора, а синфазні завади порушують умови функціонування електронного обладнання та автоматики, як власне гребного електропривода, так і інших пристроїв підключених у точці загального приєднання до мережі. Емісія синфазних перешкод у цілому впливає на форму напруги і струму мережі та їх гармонічний склад у високочастотному діапазоні та відповідно знижує якість електроенергії в ній. Тобто низька якість електроенергії внаслідок наявності диференційних і синфазних перешкод становить причину можливих аварійних ситуацій, як наслідок економічних та технологічних збитків при експлуатації суднового електрообладнання.

З названих причин зниження диференційної та синфазної складових високочастотних електромагнітних завад в суднових системах з пропульсивними електроустановками на базі частотно-регульованих асинхронних електроприводів з силовими перетворювачами частоти засобами комбінованих високочастотних пасивних фільтрів є важливою науково-прикладною проблемою, а задачі що підлягають вирішенню є актуальними.

Актуальність теми також підтверджується тим, що результати дисертаційного дослідження були використані 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).

Оцінка змісту дисертації.

Повний обсяг дисертації становить 213 сторінок друкованого тексту, містить анотацію українською та англійською мовами), зміст, перелік умовних скорочень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел і додатки. Основна

частина викладена на 160 сторінках. Список використаних джерел складається з 169 найменувань на 20 сторінках. Дисертація містить 77 рисунків та 11 таблиць.

У вступі.

Обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, показано її зв'язок з науковими програмами й темами, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено його об'єкт та предмет, представлено методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи та обґрунтування достовірності отриманих результатів, відображено повноту викладення результатів у публікаціях, особистий внесок та ступінь апробації.

У першому розділі.

На підставі аналізу структур і режимів роботи суднових електроенергетичних систем з пропульсивними електроустановками на основі частотно-регульованих асинхронних електроприводів, встановлено, що масове використання саме таких електроприводів для реалізації електричного руху суден обумовлено енергоефективністю і високим ступенем керованості, проте їх використання супроводжується генерацією широкого спектра високочастотних електромагнітних завад через застосування інверторів з ШІМ. Обґрунтовано, що основними носіями 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.

За рахунок уточнення раніше відомої еквівалентної схеми фазної обмотки асинхронного двигуна, із врахуванням міжвиткових ємностей і ємностей «фаза-корпус», було отримано більш достовірну структуру цієї схеми. Вона призначена для дослідження у розширеному частотному діапазоні (40 Гц...60 МГц) синфазних і диференційних складових електромагнітних завад, які виникають в обмотках двигуна при живленні від ШІМ-інвертора напруги у складі частотно-регульованого асинхронного електропривода. Для визначення її параметрів розвинуто аналітичні вирази, за рахунок уведення базисних величин повного опору обмоток двигуна на характерних частотах, що корелюються з експериментально виміряними

частотними залежностями повного опору обмоток для певного ряду асинхронних двигунів. Частотні залежності та відповідні їм фазові зсуви, відтворені шляхом чисельного моделювання в програмі MATLAB з урахуванням уточненої еквівалентної схеми співпадають із такими ж залежностями отриманими експериментальним шляхом. Похибка не перевищує 5%, що свідчить про доцільність застосування запропонованої еквівалентної схеми для побудови моделі асинхронного двигуна, як складової уточненої моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода призначеної для дослідження електромагнітних процесів у вхідних та вихідних колах перетворювача частоти. Уточнено структуру моделі автономного інвертора напруги з урахуванням власних та паразитних параметрів силових ключів, провідників, ємнісного зв'язку з корпусом, що суттєво впливає на якість відтворення високочастотних електромагнітних завад у складі напруг і струмів вхідних та вихідних колах перетворювача частоти. Наведено методику розрахунку параметрів кабельних ліній як таких, що впливають на характер синфазних та диференційних складових електромагнітних кондуктивних завад.

У третьому розділі.

Проведено аналіз сучасних засобів і методів зниження електромагнітних завад у частотно-регульованих асинхронних електроприводах, наведено їх класифікацію та проведено порівняння ефективності різних типів ШІМ-модуляцій та структур інверторів на рівень високочастотних електромагнітних завад. Вперше запропоновано принцип побудови комбінованого трифазного пасивного фільтра, за рахунок поєднання чотириобмоткового синфазного трансформатора і трифазного диференційного RLC-фільтра. Розроблено нову математичну модель запропонованого фільтра, за рахунок застосування теореми Тевеніна для перетворення еквівалентних схем та перетворення Лапласа при визначенні передатних функцій фільтра за диференційною і синфазною напругою, що дозволяє кількісно оцінити вплив останнього на рівень електромагнітних завад. Визначено критерії вибору параметрів схеми фільтра, з урахуванням частоти комутації, імпедансу навантаження та магнітних властивостей осердя

трансформатору фільтра. Встановлено оптимальні співвідношення між резонансною частотою фільтра та частотою комутації вентилів інвертора для досягнення максимальної ефективності зниження завад.

У четвертому розділі.

Проведено експериментальне дослідження частотно-регульованого асинхронного електропривода на фізичній та імітаційній моделях. Запропоновано методику експериментального визначення гармонічного складу високочастотних електромагнітних перешкод, що дає змогу більш точно оцінювати коефіцієнт гармонічних спотворень напруги й струму в електричних колах таких електроприводів, з урахуванням високочастотного діапазону (2,5...125 кГц) контрольованих параметрів. Результати експериментальних досліджень порівнюються з результатами імітаційного моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода без комбінованого пасивного фільтра та за його наявності у складі уточненої моделі. Це надало змогу певним чином оцінити рівень ефективності фільтра при зниженні диференційних та синфазних складових електромагнітних завад.

У додатках.

Наведено акти впровадження результатів роботи, блоки програм для обробки масивів експериментальних даних, а також фотоматеріали на яких зафіксовано процес проведення експериментальних досліджень автором роботи.

Наукова новизна роботи.

1. Отримала розвиток імітаційна модель пропульсивного частотно-регульованого асинхронного електропривода за рахунок уточнення моделей його складових – автономного інвертора напруги з ШІМ, асинхронного двигуна та кабельних ліній, яка дає можливість достовірно оцінювати характер і рівні диференційних та синфазних високочастотних складових електромагнітних завад зумовлених напругою і струмами вхідних та вихідних кіл перетворювачів частоти та, на відміну від існуючих моделей, враховує наявність ємностей «фаза-корпус» елементів електрообладнання електроприводу.

2. Розроблено уточнену еквівалентну схему фази частотно-регульованого асинхронного двигуна, яка враховує міжвиткові ємності та ємності «фаза-корпус» фазних обмоток, і дозволяє достовірно відтворювати близькі до експериментальних частотні залежності повного опору фази двигуна, і, таким чином, може бути використана при створенні уточненої MATLAB-моделі асинхронної машини для дослідження високочастотних складових електромагнітних завад, та, на відміну від попередніх працює в діапазоні частот 1 МГц – 60 МГц.

3. Отримали розвиток аналітичні вирази для визначення параметрів еквівалентної схеми фазного кола частотно-регульованого асинхронного двигуна за рахунок використання в них експериментально-встановлених базисних значень повного опору та його домінуючого характеру (індуктивний або ємнісний) на характерних частотах (в т.ч. резонансних) частотної характеристики, які можуть бути використані для певної серії двигунів.

4. Вперше запропоновано принцип зниження високочастотних електромагнітних завад в колах частотно-регульованих асинхронних електроприводів на базі перетворювачів частоти з ШІМ автономними інверторами напруги, що ґрунтується на використанні авторської структури комбінованого пасивного фільтра, який містить чотириобмотковий синфазний трансформатор та трифазний диференційний RLC-фільтр, що дозволяє певною мірою одночасно знижувати синфазні і диференційні складові завад, та, на відміну від попередніх технічних рішень, для реєстрації синфазної напруги та формування компенсуючого впливу передбачає підключення первинної обмотки трансформатора до точки загального з'єднання RC-ланок диференційного фільтра.

5. Розроблено нову математичну модель комбінованого пасивного фільтра, за рахунок застосування до його схеми еквівалентних перетворень із застосуванням теореми Тевеніна і окремо теорії двополіусників, з наступними перетвореннями Лапласа диференційних рівнянь, що надало можливість отримати кінцеві вирази передатних функцій комбінованого фільтра відповідно за синфазною і диференційною напругами та дозволяє аналітично визначати параметри елементів

схеми фільтра при заданих параметрах його ефективності, що на відміну від існуючих моделей, дозволило врахувати умови компенсації як диференційних так і синфазних складових напруги.

Практичне значення отриманих результатів.

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

2. Запропоновано методику експериментального дослідження гармонічних спотворень у діапазоні частот до 125 кГц, який поєднує цифровий осцилограф із засобами програмного 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 напруг і струмів з урахуванням діапазону (2,5 – 125 кГц).

3. Розроблено методику аналітичного визначення диференційної напруги, як різниці між фазною та синфазною напругою, вимірними в одній часовій координаті за допомогою двоканального цифрового осцилографа, з подальшою обробкою даних у застосунках MATLAB/Simulink.

4. 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.

5. Основні положення, висновки та рекомендації, що викладені в дисертаційній роботі, використовуються у навчальному процесі НУК ім. адмірала 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 освітньої 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.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дослідження підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень. застосуванням відповідних методів, коректністю прийнятих у математичних моделях припущень і підтверджується порівнянням з результатами експериментального дослідження.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях.

За темою дисертації здобувачем опубліковано 10 наукових робіт, з них 3 роботи видані у закордонних журналах, занесених до міжнародних наукометричних баз (в т.ч. Scopus, 2 – категорія Q1, 1 – категорія Q4), 1 робота опублікована у фаховому виданні України, 6 робіт в матеріалах конференцій (в т.ч. 1 робота в матеріалах конференцій Scopus).

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженням. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до здобувачів третього рівня вищої освіти (доктор філософії) відповідно до нормативних актів України.

Оформлення дисертації.

Оформлення 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 постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024). Стиль викладання відповідає загальноприйнятому і має достатній фаховий рівень.

Зауваження по дисертаційній роботі.

1. Наукова новизна №2. Термін «фаза статора» не зрозумілий, мається на увазі заступної схеми фази статора? Певним чином виключаються електромагнітні зв'язки з іншими фазами та ротором, що ймовірно має значення.

2. Наукова новизна №3. Термін «фазовий зсув повного опору» не відомий, ймовірно мова про зсув початкових фаз струму та напруги, або «аргумент функції повного опору».

3. Практичне значення №2. Виникає питання щодо розповсюдження завад у діапазоні 2,2-125кГц з урахуванням фільтруючих властивостей ліній та трансформаторів.

4. Практичне значення №№. Не зрозуміло, що представляє собою обробка даних в MATLAB Simulink.

5. РОЗДІЛ 1. Стр. 53. Нумерація рисунку спочатку 1.5. потім чомусь 1.6., хоча вочевидь мова йде про 1.5. Розповідаючи про наслідки дії синфазних напруг та струмів автор не наводить жодного доказу реєстрації чи фіксації зазначених самих параметрів. Рівно ймовірно зазначені наслідки могли бути викликані перевантаженнями чи вібраціями механічної частини машин та ін.

6. РОЗДІЛ 2. Стр. 60. Автор вводить у формулі (2.3) «номінальний опір фазної обмотки статора», але зважаючи на формулу визначення цього параметра через напругу та струм статора очевидно, що цей показник враховує також і відповідні опори ротора, розуміючи безумовно під R_n - номінальну потужність двигуна. Таким чином коректніше використовувати «модуль номінального опору фази АД». Додатково слід зазначити, що в такому вигляді це лише модуль повного опору фази двигуна, в той же час аргумент цього опору не визначається.

7. РОЗДІЛ 2. Стр. 68. Вирази (2.8 та 2.9) вочевидь припускають, що в зазначених точках частотної характеристики модуль повного опору Z дорівнює виключно ємнісному опору X_c , що на перший погляд не очевидно. Ймовірно при

цьому слід було спиратись на значення аргументу повного опору (фазу) у відповідному режимі. Надалі автор також не приділяє суттєвої уваги фазочастотним характеристикам.

8. РОЗДІЛ 3. Стр. 108. Автор не характеризує синфазний трансформатор, який вочевидь має особливості конструкції схожі з трансформатором струму, з урахуванням навантажувальної здатності обмоток, відповідного класу ізоляції, а також ймовірних несиметричних замикань в колах двигуна, які ймовірно матимуть значний вплив на магнітну систему та обмотки.

9. РОЗДІЛ 3. Стр. 112 - 113. За умови реалізації досить цікавого прийому еквівалентизації схеми заміщення пропонованого фільтра рис.3.9. автор використовує аналогію між Г-подібною схемою чотирьохполюсника з двома магнітоповязаними котушками індуктивності, та Т-подібною схемою чотирьохполюсника рис.3.9., але на останній схемі в паралельній гілці наявні резистор та конденсатор. Виникає питання що до коректності такої еквівалентизації.

10. РОЗДІЛ 3. Стр. 121. Висновок 6. «Розроблено нову математичну модель комбінованого пасивного фільтра шляхом застосування еквівалентних перетворень, заснованих на теоремі Тевеніна та теорії двополюсників», але термін «двополюсник» в розділі не згадується за виключенням «Т-подібного кола двополюсної мережі», яке (коло) у загальному випадку є чотирьохполюсником. Такий підхід певним чином спантеличує. Нажаль автор не навів частотних характеристик пропонованого технічного рішення, що вкрай важливо для фільтруючих пристроїв.

11. РОЗДІЛ 4. П.4.3. переобтяжений часовими діаграмами та спектрограмами які автор характеризує групами, частину з них можна було винести у додаток.

Проте вважаю, що зазначені зауваження не знижують її наукової та практичної цінності і не впливають на загальний позитивний висновок по виконаній роботі.

Висновок.

Дисертація Козлова М. О. «Зниження високочастотних кондуктивних електромагнітних завад в пропульсивних електроустановках суден з частотно-

регульованими асинхронними електроприводами» є завершеною та самостійною науково-дослідною роботою, в якій вирішується важлива наукова задача зниження високочастотних електромагнітних завад в пропульсивних частотно-регульованих асинхронних електроприводів комбінованим пасивним фільтром диференційних та синфазних складових завад.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень 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».

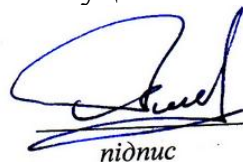
Офіційний опонент

доцент, кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки Кременчуцького

національного університету

імені Михайла Остроградського



підпис

Олексій БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ