

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Обрубова Андрія Валерійовича
«Методи та моделі дослідження електромагнітних процесів резонансних
перетворювачів електроенергії»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Актуальність теми дисертаційного дослідження

Резонансні перетворювачі сьогодні є окремим класом силових перетворювачів електроенергії, в яких використовуються явища резонансу в електричних контурах для підвищення енергоефективності, керованості, надійності, робочого ресурсу тощо. Тенденції наукових досліджень в сфері силової електроніки свідчать про значну увагу науковців та інженерів до розвитку і впровадження резонансних перетворювачів у сучасні системи електроживлення. Здатність працювати в діапазоні високих частот при малих комутаційних втратах дає резонансним перетворювачам значні переваги перед іншими видами перетворювачів з жорсткою комутацією силових вентилів. Але порівняно більша складність структури вимагає застосування спеціальних методів керування та моделювання електромагнітних процесів, характерних для силових схем резонансних перетворювачів. Тому, здійснений в дисертаційній роботі Обрубова А.В. розвиток теорії високочастотних перетворювачів параметрів електроенергії з резонансними контурами для підвищення ефективності аналізу електромагнітних процесів та поліпшення параметрів систем живлення є розв'язанням актуальної наукової проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами
Дослідження по темі дисертаційної роботи виконано в рамках виконання 9 госпдоговірних робіт вищого навчального закладу Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова спільно з підприємствами України та науково-дослідних робіт, які фінансовано Міністерством освіти і науки України: НДР 1525, 2004-2007 рр., «Резонансні перетворювачі постійної напруги

для живлення суднових систем автоматики та спеціальних систем” (№ДР 0104U003097, обл. №0207U002638); НДР 1628, 2007-2008 рр., “Напівпровідникові перетворювачі електроенергії з резонансними контурами для суднових електроустановок і систем автоматики” (№ДР 0107U000716, обл. №0209U002368); НДР 1713, 2009-2010 рр., “Суднові резонансні та квазірезонансні перетворювачі постійної напруги з фазовим та широтно-частотним регулюванням” (№ДР 0109U002219, обл. №0211U000585, інв. №0711 001616); НДР 1816, 2011-2012 рр., “Перетворювачі постійної напруги на основі резонансних інверторів для суднових систем автоматики та спеціальних систем” (№ДР 0111U002316, обл. №0213U000325, інв. №0713 001322); НДР 1895, 2013-2014 рр., “Розробка суднових систем генерації та перетворення електроенергії для підвищення енергоефективності та поліпшення електромагнітної сумісності” (№ДР 0113U000242, обл. №0215U007234, інв. №0715 005229); НДР 1993, 2015-2016 рр., “Розробка енергоефективних суднових автоматизованих систем генерації та перетворення електроенергії для підвищення якості електроенергії та поліпшення електромагнітної сумісності” (№ДР 0115U000304, обл. №0217U000573, інв. №0717 001575); НДР 2084, 2017-2018 рр., “Розробка енергоефективних суднових систем автоматизації процесів генерування й перетворення електроенергії та їх моделей для покращення якості електроенергії та електромагнітної сумісності” (№ДР 0117U000346, обл. №0219U003422, інв. №0719 003454); НДР 2192, 2019- 2020 рр., “Розробка засобів покращення ефективності, якості електроенергії та електромагнітної сумісності в суднових електроенергетичних системах з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії” (№ДР 0119U002104, обл. №0221U104219, інв. №0711 001616); НДР 2270, 2021-2022 рр., “Розробка засобів суднових систем генерації та перетворення електроенергії для підвищення енергоефективності та поліпшення електромагнітної сумісності” (№ДР 0121U112133). Автор був відповідальним виконавцем вказаних держбюджетних науково-дослідних робіт і приймав безпосередню участь у їх виконанні.

Оцінка обґрунтованості та значення наукових положень дисертації, їх достовірності та новизни

Ознайомившись зі змістом дисертаційного дослідження Обрубова А.В., опублікованими науковими працями та рефератом дисертації, можна стверджувати, що завдання, результати і висновки поданої до розгляду роботи цілком обґрунтовані. В роботі згідно до вимог сформульована актуальність теми, визначено об'єкт (електромагнітні процеси у високочастотних напівпровідникових перетворювачах параметрів електроенергії з резонансними контурами) та предмет дослідження (методи аналізу, математичні моделі та методики розрахунку електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з резонансними контурами). Мета і завдання дослідження цілком відповідають заявленій темі. Достатньо широким є перелік використаних джерел, який включає в себе 253 джерела (з них 169 іноземною мовою).

Перевагою роботи є створення узагальненого підходу до побудови математичної моделі, яка лежить в основі запропонованих динамічної і статичної моделей резонансного перетворювача і дає можливість розрахувати робочі характеристики. Запропоновано чіткий і зрозумілий алгоритм визначення параметрів передатних функцій резонансних перетворювачів для їх представлення в моделях систем живлення як керованих об'єктів. Спочатку автор аналізує силову схему резонансного перетворювача з мостовим інвертором та випрямлячем і представляє її у вигляді еквівалентного лінійного багатополюсника, до якого підключено генератори складових напруг на виході інверторного і на вході випрямного мостів (с. 138). Математична модель силовій схеми резонансного перетворювача (розділи 3, 5) будується згідно з законами Ома і Кірхгофа та з принципом суперпозиції, що, як стверджує автор, дає можливість враховувати різні алгоритми комутації силових вентилів (с. 182). На основі даної моделі визначаються вирази перехідних функцій еквівалентної схеми для певних «послідовностей комбінацій джерел напруги» (с. 34, с. 182, с. 238). Згідно з принципом припасування формується дискретна перехідна функція еквівалентного багатополюсника для обраного алгоритму комутації

ключів. Сукупність зображень по Лапласу дискретних перехідних функцій для всіх входів і виходів багатополюсника представляють собою дискретну динамічну модель резонансного перетворювача (с. 135, с. 150). Статична модель резонансного перетворювача представляє собою крайній варіант його динамічної моделі при сталих процесах. Основною величиною статичної моделі є функція стаціонарного струму (с. 191), яка утворюється методом припасування розв'язань. Статична модель використовується для визначення умов узгодження фаз еквівалентних генераторів схеми резонансного перетворювача (розділ 4, параграфи 4.1.2, 4.1.3) і для розрахунку його статичних характеристик (розділ 5). Для уточнення наслідків припущень щодо лінійності елементів схеми використовується вдосконалений експериментально-аналітичний метод (розділ 6, с. 313-323). Істинність динамічної та статичної моделей перевірялася способом порівняння результатів модельних експериментів з імітаційними моделями резонансних перетворювачів, побудованими різними способами, включаючи моделі, складені на основі розроблених математичних моделей (с. 162-178, с. 213-223, с. 316-321, с. 356-360, с.363-365). Збіжність теоретичних і експериментальних результатів в ході чисельних розрахунків свідчить про відповідність запропонованих автором математичних моделей реальним схемам резонансних перетворювачів.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження не викликає сумнівів і полягає в наступному:

1. Вдосконалено метод суперпозиції для розрахунку електромагнітних процесів резонансних перетворювачів, який відрізняється новим підходом до визначення складових процесів на основі монотонних ступінчастих функцій і створення математичної моделі резонансного перетворювача, що враховує різні алгоритми комутації вентилів.

2. Вперше запропоновано нові дискретні динамічні моделі резонансного перетворювача, які відрізняються від відомих визначенням імпульсних функцій еквівалентної дискретної системи із перехідних функцій пасивної частини

силової схеми і за допомогою яких отримано передатні функції резонансних перетворювачів як об'єктів керування.

3. Отримав подальший розвиток експериментально-аналітичний метод дослідження і визначення параметрів динамічної моделі резонансного перетворювача в частині суміщення в початковій експериментальній моделі передатних ланок на основі аналітичних виразів і структурних моделей підсхем на основі причинно-наслідкових зв'язків, що дало можливість врахування нелінійності елементів силової схеми.

4. Розроблено комбінований метод аналізу процесів резонансного перетворювача на основі суміщення принципів суперпозиції і припасування, з використанням якого шляхом побудови функцій квазіусталеного струму контуру отримано розрахункові вирази статичних характеристик для різних алгоритмів комутації і робочих областей регулюючих величин.

5. З використанням запропонованих методів та моделей визначено нові важливі залежності між регулюючими величинами, параметрами силових схем і вихідними величинами, які дали можливість узгодити фази еквівалентних генераторів з фазою коливань струму резонансного контуру і встановити умови подібності розрахованих процесів процесам реального резонансного перетворювача, а також побудувати сімейства його статичних та динамічних характеристик.

Практичне значення роботи полягає в розробці алгоритму визначення параметрів передатних функції резонансних перетворювачів при різних способах регулювання вихідних величин на сонові (с. 106, с. 110, с. 114-116, с. 122-123, с. 163-165). Використання вдосконаленого методу суперпозиції в порівнянні з класичним методом розрахунку скоротило час для розрахунків процесів резонансних перетворювачів, що підтверджується незмінною структурою математичної моделі на протязі робочого циклу. Комутація в двотактній схемі резонансного перетворювача враховуються за допомогою розкладення функцій ЕРС еквівалентних джерел на монотонні ступінчасті складові, що спростило побудову розрахункових формул. Новий підхід до

аналізу сталих процесів дав можливість розрахувати статичні характеристики (с. 254-249) резонансних перетворювачів для двох алгоритмів комутації вентилів. Вдосконалений експериментально-аналітичний метод дав змогу врахувати нелінійні характеристики випрямляча і резонансного перетворювача при частотному регулюванні (с. 319-321). Правильність математичної моделі було підтверджено розрахунками регулювальних характеристик лабораторного зразка методом суперпозицій та експериментальною перевіркою збіжності результатів (с.343-360). Запропонований цифровий регулятор дозволив підвищити в 1,5 разів швидкість регулювання вихідних величин і збільшеними запасами стійкості по фазі в порівнянні з резонансним перетворювачем під керуванням регулятора зі сталими параметрами (с.361-370).

На основі запропонованих методів та моделей розроблено і впроваджено ряд високоефективних зразків резонансних перетворювачів: високовольтне джерело на основі резонансного перетворювача (ТОВ «Осціллон», м. Миколаїв); джерело живлення для стенду іспиту ізоляції на основі резонансного перетворювача (ТОВ «Інтер-Електро», м. Київ); система управління резонансним перетворювачем з нелінійним цифровим регулятором (ТОВ «Елемент-Перетворювач», м. Запоріжжя). Матеріали дисертації впроваджено в навчальний процес НУК ім. адм. Макарова. Також результати дисертаційних досліджень використано у 9 держбюджетних науково-дослідних роботах НУК ім. адмірала Макарова, в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Всі отримані автором результати є новими, достовірними та належно обґрунтованими.

Повнота викладу основних результатів дисертації підтверджується апробацією результатів дисертаційного дослідження в публікаціях у фахових виданнях, оприлюдненням на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Результати дисертації опубліковано у 62 наукових роботах, у тому числі: 2 монографіях, 2 навчальних посібниках з грифом МОН України, 34 статтях у наукових фахових виданнях України, 9 патентів України на корисні моделі, 15 у матеріалах наукових конференцій, серед яких 7 робіт

включено до міжнародної наукометричної бази Scopus і в т. ч. 3 видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science.

Мова та стиль дисертації

За змістом подана дисертація в цілому вирішує поставлену мету та завдання дослідження. Текст дисертації викладено державною мовою аргументовано, логічно та послідовно. Стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Структура дисертації та реферату дисертації, оформлення, мова та стиль викладення відповідають вимогам, які ставить до докторських дисертацій Міністерство освіти і науки України.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Обрубова А.В. є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Зауваження та рекомендації щодо змісту дисертації:

1. У розділі 1 роботи говориться про підходи на основі часової та частотної областей аналізу процесів, зокрема, спектральних методів, але далі в роботі приділено основну увагу аналізу процесів в часовій області. Доцільно було навести пояснення щодо ефективності застосування також і спектральних методів для аналізу процесів резонансних перетворювачів.

2. В динамічній моделі резонансного перетворювача з амплітудним регулюванням (с. 112, табл. 2.2, 1-й рядок) широтно-імпульсний перетворювач описано аперіодичною ланкою з постійною часу τ_1 , діапазон значень якої складає 50..250 мс (с. 114). Але в роботі немає пояснень, звідки з'явилася така велика інерційність чому прийнято саме такий діапазон її значень.

3. Рекомендація поєднання дискретної динамічної моделі резонансного перетворювача з неперервною в третьому розділі потребує додаткових пояснень,

оскільки, як відомо, неперервна модель, на відміну від дискретної, відтворює процеси на всьому проміжку часу досліджень і може бути самодостатньою з точки зору результатів моделювання.

4. Доцільно було б оцінити діапазон істинності запропонованої динамічної моделі резонансного перетворювача «в малому», наприклад, у відсотках від діапазону зміни величин.

5. Якщо запропонована математична модель резонансного перетворювача є лінеаризованою, то бажано було у вступі в частині опису методів досліджень вказати, які методи лінеаризації використовувалися в роботі.

Також є деякі зауваження щодо оформлення:

6. В роботі дуже часто використовуються терміни, які є «калькою» з російської мови: замість «електричні ланцюги» треба застосовувати - «електричні кола», замість «електромагнітні перешкоди» - «електромагнітні завади» і т.п.

7. Скорочення «РП – резонансний перетворювач», що є одним з основних понять роботи і використовується в рисунках другого розділу, можна було розповсюдити на весь текст роботи. Взагалі систему україномовних скорочень, використаних в роботі, можна було дещо оптимізувати за частотою входження термінів.

8. В розділі 4 на рис.3.7-рис.3.11 не зрозуміло, в яких одиницях наведено графіки похибки $E(n)$. Якщо це вихідні величини моделей перетворювача, то напевно вони повинні відповідати параметрам електроенергії.

9. На с. 186 в другому абзаці та на стр.191 в першому абзаці пропущена точка.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Обрубова А.В.

Відповідність реферату змісту дисертаційної роботи

У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого дослідження. Зміст реферату та основні положення дисертаційної роботи є ідентичними.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Вважаю, що дисертаційна робота Обрубова Андрія Валерійовича на тему «Методи та моделі дослідження електромагнітних процесів резонансних перетворювачів електроенергії» є завершеною науковою працею, що виконана на високому науковому і методичному рівнях, в якій представлено нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності аналізу електромагнітних процесів резонансних перетворювачів електроенергії та поліпшення характеристик систем електроживлення шляхом вдосконалення існуючих і створення нових розрахункових методів та математичних моделей. Реферат повністю відображає основні положення дисертації. За актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною, змістом та оформленням дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пп. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її автор Обрубов Андрій Валерійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу транзисторних перетворювачів

Інституту електродинаміки НАН України,

доктор технічних наук, професор



Олег ЮРЧЕНКО

«09» січня 2024 року

Підпис О.М. Юрченка засвідчую.

Вчений секретар ІЕД НАН України, к.т.н.



Марина ГУТОРОВА