

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.

Високі показники енергоефективності, компактність і невелика матеріаломісткість високочастотних напівпровідникових перетворювачів електроенергії обумовлюють зростаюче їх застосування в джерелах живлення електричного обладнання. Важливими задачами при створенні таких джерел живлення є удосконалення характеристик напівпровідникових перетворювачів в напрямку підвищення їх коефіцієнту корисної дії, поліпшення масогабаритних параметрів, зниження генерованих перешкод шляхом зниження комутаційних втрат та підвищення робочих частот. Перетворювачі електроенергії резонансного типу надають потенційні можливості для підвищення робочих частот та зниження комутаційних втрат в силових діодах та транзисторах. Але специфіка резонансних схем, зокрема, суттєва чутливість до параметрів навантаження, порівняно складніший характер електромагнітних процесів, обмеженість регулювання вихідних величин, створюють певні труднощі в застосуванні, проектуванні та дослідженні резонансних перетворювачів.

В дисертаційній роботі Обрубова А.В. вирішується актуальна науково-практична задача вдосконалення існуючих та розробки нових ефективних методів дослідження та математичних моделей, які дадуть змогу розраховувати статичні та динамічні характеристики резонансних перетворювачів електроенергії та поліпшити параметри систем живлення на основі резонансних перетворювачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами
Дослідження по темі дисертаційної роботи виконано на кафедрі

комп'ютеризованих систем управління та на кафедрі суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова в рамках виконання 9 госпдоговірних робіт 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.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації та їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність наукових положень дисертаційної роботи Обрубова А.В. забезпечується великим обсягом експериментального матеріалу та багатостороннім аналізом літературних джерел, від теоретичних, які охоплюють сучасні методи аналізу електромагнітних процесів та створення математичних моделей високочастотних перетворювачів електроенергії, зокрема і резонансного типу, до науково-практичних, в яких представлено вирішення ряду супутніх задач по дослідженню характеристик резонансних перетворювачів спеціального призначення, розробці нових силових схем та способів регулювання вихідних величин. Обґрунтованість результатів роботи підтверджується також систематизованим підходом до досягнення мети дослідження та використанням адекватних методів для вирішення поставлених завдань. При вирішенні поставлених в дисертаційній роботі завдань використано теоретичні методи розрахунку лінійних електричних кіл при складенні диференційних рівнянь схем заміщення резонансного перетворювача, методи неперервного і дискретного перетворення Лапласа для розв’язань диференційних рівнянь і для виводу передатних функцій, метод простору станів для символічних розрахунків в пакеті Matlab, запропонований метод суперпозиції для створення математичної моделі резонансного перетворювача, визначення розрахункових виразів сталого режиму і виразів узгодження фаз еквівалентних генераторів схеми заміщення, вдосконалений експериментально-аналітичний метод для уточнення нелінійностей силової схеми і для визначення уточнених передатних функцій резонансного перетворювача, метод структурних схем для створення структурних імітаційних моделей резонансного перетворювача, графоаналітичний метод для побудови і досліджень статичних

характеристик резонансних перетворювачів при різних способах регулювання, метод припасування розв'язків для визначення рівнянь стаціонарних струмів контуру, методи імітаційного моделювання резонансних перетворювачів для експериментальної перевірки результатів теоретичних досліджень, методи автоматизованого символічного та числового аналізу для алгебраїчних перетворень виразів і для обробки результатів досліджень, розрахунків характеристик і для побудови графіків. Одержані в роботі результати узгоджуються з відомими висновками інших дослідників та теоретичними основами електротехніки і обговорені на авторитетних наукових конференціях.

Структура та зміст дисертації

Структура дисертації цілком узгоджується з її назвою, метою і завданнями дослідження. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертації становить 405 сторінок, у тому числі 335 сторінок основного тексту, 135 рисунків, 17 таблиць, 253 найменування використаних джерел на 27 сторінках, 3 додатки на 6 сторінках, що відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій.

У вступі (стор. 38-47) обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і завдання наукового дослідження, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, вказано об'єкт та предмет дослідження, перелічено методи досліджень. Викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, публікації за темою досліджень, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі (стор. 48-75) наведено постановку проблеми дослідження, зроблено огляд методів, прийнятних для аналізу процесів резонансних перетворювачів, окремо розглянуто особливості кожного і обґрунтовано доцільність використання в дослідженнях методів суперпозиції і припасування розв'язків, на основі дуальності методів показана можливість їх суміщення.

У другому розділі (стор. 76-132) проаналізовано головні особливості РП, визначено реалізацію способів регулювання вихідних величин, оцінено характер зміни властивостей резонансних перетворювачів при різних способах регулювання і зроблено класифікацію резонансних перетворювачів за деякими ознаками електромагнітних процесів.

У третьому розділі (стор. 133-183) розглянуто відомості про метод суперпозиції (накладання) та його розвиток, зокрема, в чому полягає існуючий метод суперпозиції і особливості запропонованого вдосконаленого методу суперпозиції, сформульовано умови застосування та концепція вдосконаленого методу суперпозиції. Наведено лінійну математичну модель, розглянуто особливості динамічної моделі резонансного перетворювача, визначеної методом суперпозиції. Наведено дискретну динамічну модель для амплітудної модуляції на основі елементарної перехідної функції неперервної частини схеми заміщення резонансного перетворювача, визначено базову передатну функцію, проведено моделювання дискретної динамічної моделі в порівнянні з моделлю резонансного осцилятора, проаналізовано природу биттів коливань осцилятора.

У четвертому розділі (стор. 184-223) розглянуто умови узгодження параметрів еквівалентних генераторів коливань з процесами схеми заміщення, зокрема, визначено умови і задачі узгодження, визначено залежності фазового зміщення еквівалентних генераторів схеми резонансного перетворювача від вихідної напруги та інших параметрів, виражено стаціонарний струм контуру в загальній формі, за допомогою якого визначено характеристики статичної моделі резонансного перетворювача, виконано порівняння процесів, розрахованих за допомогою математичної моделі резонансного перетворювача, з результатами імітаційного моделювання.

У п'ятому розділі (стор. 224-287) виконано дослідження характеристик резонансного перетворювача методом суперпозиції, а саме розглянуто N -мостову схему, наведено математичну модель зі схемою заміщення з L -контурами, наведено динамічну модель резонансного перетворювача на основі

принципу суперпозиції, статичні характеристики, надано результати моделювання резонансного перетворювача в динамічних режимах роботи.

У шостому розділі (стор. 288-328) виконано аналіз процесів резонансного перетворювача експериментально-аналітичним методом, за допомогою якого враховано нелінійні характеристики його силових елементів і підсхем. Розглянуто переваги експериментально аналітичного методу та його розвиток, зроблено аналіз публікацій, огляд методів досліджень резонансного перетворювача, визначено особливості і концепції експериментально-аналітичних методів, обґрунтовано застосування даного методу для дослідження процесів в схемі резонансного перетворювача, сформульовано особливості запропонованого вдосконаленого експериментально-аналітичного методу, наведено структурну модель резонансного перетворювача і моделі його підсхем, визначено параметри експериментальної моделі і наведено результати експериментів.

У сьомому розділі (стор. 329-370) наведено практичну реалізацію експериментального LLC-резонансного перетворювача, надано результати експериментальної перевірки, побудовано експериментальні характеристики і порівняно с розрахованими, наведено імітаційну модель резонансного перетворювача на основі математичної моделі, створеної методом суперпозиції, для порівняння результатів моделювання з даними натурних експериментів, наведено опис нелінійного ПІД-регулятора системи управління резонансного перетворювача.

Висновки, зроблені за проведеними Обрубовим А.В. дослідженнями, охоплюють весь обсяг отриманих результатів і є достовірними.

В цілому за змістом дисертація є завершеною роботою, яка забезпечує суттєвий внесок в теорію та практику резонансних перетворювачів електроенергії. Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. Оформлення дисертаційної роботи в цілому відповідає чинним вимогам.

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). Істинність 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.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання виконано повністю. Всі отримані автором результати є новими, достовірними та належно обґрунтованими впровадженнями опитних зразків, опублікованими науковими працями та результатами експериментів.

Повнота викладення результатів роботи у наукових працях

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

Дисертація написана державною мовою, загалом грамотно і зрозуміло. Виклад матеріалу в роботі має логічну послідовність, наукова термінологія є загальноновизнаною, розділи взаємопов'язані та цілком розкривають поставлену мету, стиль викладення результатів досліджень, нових наукових положень та висновків забезпечує доступність їх сприйняття. Результати проілюстровані високоякісними рисунками, графіками та фотоматеріалами.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи:

1. Метою дисертаційних досліджень визначено підвищення ефективності аналізу електромагнітних процесів в резонансних перетворювачах електроенергії, однак дисертантом не було перевірено трудомісткість розрахунків запропонованої модифікації метода суперпозиції та експериментально-аналітичного метода і не проведено порівняльного аналізу із існуючими методами.

2. Отримані дисертантом математичні моделі процесів у резонансних перетворювачах адаптовано для розрахунку перехідних процесів, але не

запропоновано методики безпосереднього розрахунку стаціонарного режиму роботи перетворювачів, що суттєво знижує трудомісткість розрахунків.

3. У науковій новизні декларується розробка комбінованого методу аналізу процесів резонансного перетворювача на основі суміщення принципів суперпозиції і припасування. Однак добре пропрацьовано лише використання принципу суперпозиції, тоді як використання методу припасування при неоднозначній відповідності алгоритмів комутації і послідовності комутації лише декларується без детального аналізу.

4. Практична цінність дисертації сформульована не чітко і потребує доопрацювання.

5. Другий розділ дисертації має здебільшого описовий характер без достатнього акцентування на вирішуваних у роботі проблемах.

6. У роботі при описі фіксації значень математичної моделі для подальших розрахунків помилково зазначається використання ШІМ 2-го роду замість 1 роду.

7. У параграфі 3.4. не вистачає таблиці або структурної схеми, що узагальнює класифікацію динамічних моделей.

8. У тексті дисертації є русизми та некоректно вжиті терміни, наприклад «протягом зневажливо малих проміжків часу», «імпульсу напругі», «різко побільшати струм», «тем уже ділянки» і т.д.

Висловлені зауваження носять дискусійних характер та направлені на вдосконалення подальшої роботи здобувача і не зменшують значимість отриманих результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

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 кафедри

електронних пристроїв та систем

Національного технічного університету України

“Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського”,

доктор технічних наук, доцент

