

**ВІДГУК****офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Обрубова Андрія Валерійовича  
«МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ  
РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ»,  
представлену на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук за спеціальністю  
05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

**Актуальність теми дисертації.**

Резонансні перетворювачі електроенергії на сьогодні набули широкого застосування про живленні радіоелектронної апаратури в різних сферах діяльності людини. Саме використання резонансного контура в силовій частині перетворювача забезпечує м'яку комутацію силових ключів, що призводить до зменшення комутаційних втрат, відповідно гарантує як вищий коефіцієнт корисної дії, так і нижчий рівень створюваних електромагнітних завад, дозволяє забезпечити вищий рівень робочої частоти перетворювача, що позитивно відбивається на масо-габаритних характеристиках та якості вихідної напруги, а також забезпечує захист від струмових перевантажень, що в цілому підвищує рівень надійності таких перетворювачів. Якраз ці переваги є визначальними при живленні цілого ряду відповідальних споживачів.

На етапі проектування резонансних перетворювачів виникає необхідність в створенні математичних моделей, що дають змогу аналізувати електромагнітні процеси з використанням сучасних програмних засобів. Існуючі методи аналізу та математичні моделі резонансних перетворювачів застосовуються переважно для аналізу електромагнітних процесів окремих силових схем і алгоритмів комутації силових вентилів. Однак використання резонансних перетворювачів в системах автоматики вимагає визначення їх поведінки як керованих об'єктів. Тому потребує подальшого розвитку теорія резонансних перетворювачів з врахуванням узагальнених методів розрахунку процесів в них і створення математичних моделей, які дадуть змогу розраховувати їхні статичні та динамічні характеристики

**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 з підприємствами України та науково-дослідних робіт, які фінансовано Міністерством освіти і науки України:

- 1) НДР 1525, 2004-2007 рр., “Резонансні перетворювачі постійної напруги для живлення суднових систем автоматики та спеціальних систем” (№ДР 0104U003097, обл. №0207U002638);

- 2) НДР 1628, 2007-2008 рр., “Напівпровідникові перетворювачі електроенергії з резонансними контурами для суднових електроустановок і систем автоматики” (№ДР 0107U000716, обл. №0209U002368);
- 3) 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);
- 4) 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);
- 5) 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);
- 6) 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);
- 7) 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);
- 8) 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);
- 9) 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.

### **Мета роботи, методи досліджень.**

Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії високочастотних перетворювачів параметрів електроенергії з резонансними контурами для підвищення ефективності аналізу електромагнітних процесів в їх силових схемах та поліпшення динамічних параметрів систем живлення з використанням резонансних перетворювачів як керованих об’єктів.

*Об’єктом дослідження* є електромагнітні процеси у високочастотних напівпровідникових перетворювачах параметрів електроенергії з резонансними контурами.

*Предметом дослідження є методи аналізу, математичні моделі та методики розрахунку електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з резонансними контурами.*

Методи досліджень. При вирішенні поставлених в дисертаційній роботі завдань використано теоретичні методи розрахунку лінійних електричних кіл, теорію диференціальних рівнянь, методи неперервного і дискретного перетворення Лапласа, метод простору станів, 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, графоаналітичний метод для побудови і досліджень статичних характеристик, метод припасування розв'язків для визначення рівнянь стаціонарних струмів контуру, структурне та схемне імітаційне моделювання перетворювачів.

### **Наукова новизна результатів.**

Офіційний опонент погоджується з основними положеннями наукової новизни представленої докторської дисертації.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- 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;

- 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;

- 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;

- 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;

- 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 одержаних результатів** полягає у наступному:

1) Вдосконалено метод суперпозиції, використання якого в порівнянні з класичним методом розрахунку, як мінімум наполовину дозволило скоротити час для розрахунків процесів резонансних перетворювачів з врахуванням різної кількості джерел енергії та алгоритмів комутації вентилів. Представлення ЕРС еквівалентних джерел схеми заміщення резонансного перетворювача суперпозицією монотонних ступінчастих складових значно спростило побудову формул для розрахунків параметрів стаціонарних режимів. Врахування різних алгоритмів комутації вентилів в динамічних моделях досягнуто завдяки визначенню елементарних вхідних імпульсів і перехідних функцій багатополосників схем заміщення резонансних перетворювачів.

2) Запропоновано новий підхід до розрахунку сталих значень перехідних процесів, який дав можливість визначити робочі області на полі вихідних параметрів резонансного перетворювача в залежності від параметрів елементів його силової схеми.

3) Вдосконалено експериментально-аналітичний метод дослідження моделей резонансного перетворювача, який використано для уточнення структур і параметрів динамічних моделей перетворювача з врахуванням нелінійностей характеристик елементів і для визначення коефіцієнтів налаштування регулятора системи керування.

4) Розроблено математичні моделі типових підсхем резонансних перетворювачів, за допомогою яких створено ряд імітаційних моделей резонансних перетворювачів для експериментальних досліджень. Вони можуть бути використані в дослідницькій практиці та в навчанні для визначення динамічних моделей резонансних перетворювачів.

5) Створено адаптивний цифровий регулятор резонансного перетворювача на основі розроблених математичних моделей типових підсхем резонансних перетворювачів, що дозволило в 1,5 рази підвищити швидкість регулювання вихідних величин із збільшеними запасами стійкості по фазі в порівнянні з резонансним перетворювачем під керуванням автоматичного регулятора зі сталими параметрами. Крім того, автоматичний регулятор має набір функцій приналежності, які забезпечують швидку реакцію на великі відхилення і повільнішу реакцію на малі відхилення для збереження стійкості регулювання в малому, що є корисним при роботі з об'єктами керування з великою коливальністю, подібними до резонансних перетворювачів.

б) Розроблено і впроваджено ряд високоефективних зразків резонансних перетворювачів на основі запропонованих методів та моделей. Зокрема, високовольтне джерело живлення на основі резонансного перетворювача для електростатичних технологій нанесення порошкових покриттів (ТОВ «Осціллон», м. Миколаїв); джерело живлення на основі резонансного перетворювача для стенду випробування ізоляції (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 при виконанні 9 держбюджетних науково-дослідних робіт НУК ім. адмірала Макарова.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та методи досліджень.**

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень. Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, обумовлюється обраними загально-апробованими методами досліджень: використанням теоретичних методів розрахунку лінійних електричних кіл, теорією диференціальних рівнянь, методами неперервного та дискретного перетворення Лапласа, методом простору станів, методом суперпозиції, експериментально-аналітичним методом, методом структурних схем, графоаналітичним методом, методом припасування розв'язків, структурним та схемним імітаційним моделюванням перетворювачів.

Наукові положення, висновки та рекомендації підтверджуються публікаціями у фахових виданнях та апробацією на наукових конференціях.

### **Основний зміст дисертації.**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформовано мету і задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** наведено постановку проблеми дослідження, зроблено огляд методів, прийнятних для аналізу процесів резонансних перетворювачів (РП), розглянуто їх особливості, обґрунтовано доцільність використання в дослідженнях методів суперпозиції і припасування розв'язків. На основі дуальності методів показана можливість їх суміщення.

На основі аналізу методів, що використовуються в математичному моделюванні РП та аналізі електромагнітних процесів в них, обґрунтовано

необхідність створення узагальненого методу аналізу процесів РП для різних алгоритмів комутації, який спростить дослідження характеристик РП. Проведено огляд відкритих публікацій за тематикою досліджень.

Сформульовано умови застосування методу суперпозиції при аналізі електромагнітних процесів в РП та означено область застосування методу суперпозиції з методом припасування розв'язків.

У **другому розділі** проаналізовано головні особливості РП, визначено реалізацію способів регулювання вихідних величин, оцінено характер зміни властивостей РП при різних способах регулювання і зроблено класифікацію РП за деякими ознаками електромагнітних процесів.

Сформульовано основні переваги РП, в той час і наголошено на їх недоліках. Зокрема - складність дослідження електромагнітних процесів; підвищена коливальність перехідної характеристики РП як об'єкта керування; зниження коефіцієнтів використання силових ключів по струму і по напрузі; обмежений діапазон регулювання вихідних величин; дороговартісні комплектуючі і матеріали силової схеми. Вказано шляхи їх подолання на етапі проектування.

Розглянуто принципи схемної реалізації амплітудного регулювання (АР), частотного (ЧР), широкосмугового та вузькосмугового фазового регулювання (ШФР та ВФР), широтного (ШР), широтно-частотного (ШЧР) і релейного способів регулювання (РР) на прикладі системи керування і структури мостової схеми РП.

Сформульовано особливості РП при різних способах регулювання. Розроблено рекомендації їх застосування в залежності від бажаних параметрів РП.

У **третьому розділі** запропоновано вдосконалений метод суперпозицій, що дає можливість створити лінеаризовану математичну модель резонансного перетворювача для миттєвих величин, яка враховує різні алгоритми комутації вентилів та в свою чергу дає можливість розрахувати характеристики перетворювача. Для цього розглянуто особливості застосування існуючого методу суперпозицій для аналізу процесів перетворювачів та інших електротехнічних систем. Визначено обмеження методу суперпозицій щодо лінійності і стаціонарності схеми. Основною ідеєю запропонованого методу є визначення простих за виразами та універсальних складових процесів, які можна комбінувати для формування математичних моделей резонансних перетворювачів для потрібних режимів і алгоритмів комутації вентилів. Описано весь алгоритм створення вдосконаленого методу суперпозицій. Саме він лежить в основі створення динамічної моделі резонансного перетворювача. Отримана динамічна модель резонансного перетворювача для амплітудної модуляції описує взаємозв'язок значень напруги живлення і вихідних величин в моменти початку кожного робочого циклу резонансного перетворювача. Період дискретності дорівнює періоду робочого циклу перетворювача. Для визначення динамічної моделі з дрібними періодом квантування запропоновано застосовувати метод припасування розв'язків. Проведено експерименти

імітаційного моделювання, які дозволили встановити адекватність дискретних динамічних моделей на основі структурних схем неперервним моделям на основі електричних ланцюгів. При цьому похибка моделювання процесів резонансного осцилятора як різниці між вихідними величинами обох моделей в різних режимах не перевищувала 0,5%.

У **четвертому розділі** представлено вирішення задачі узгодження параметрів еквівалентних генераторів з процесами схеми заміщення резонансного перетворювача. Необхідність узгодження виникла із прийняття умови методу суперпозицій про незалежність еквівалентних генераторів, які не завжди можна вважати незалежними. Із множини розв'язків математичної моделі перетворювача вибрано ті розв'язки, які узгоджуються з принципом дії перетворювача. Узгодженими повинні бути амплітуди і фази коливань еквівалентних генераторів, які в схемі, наближеній до реальної схеми перетворювача, були б залежними від процесів в схемі або відомими джерелами (діодні і синхронні випрямлячі, інвертори з автогенерацією, тиристорні схеми).

В результаті досліджень було встановлено умови узгодження для загального випадку і для двомостового резонансного перетворювача, схема заміщення якого має два еквівалентні генератори. Наведено графіки залежностей фази генератора від регулюючої величини і опору навантаження. Визначено функції стаціонарного струму контуру з використанням методу припасування розв'язків, які дають можливість розрахувати статичні характеристики резонансного перетворювача. Виконано перевірку отриманих залежностей і результатів розрахунків процесів з результатами імітаційного моделювання. Перевірка показала добру збіжність результатів з точністю на гірше 1%, що свідчить про спроможність вдосконаленого методу суперпозицій.

У **п'ятому розділі** проведено дослідження характеристик резонансного перетворювача вдосконаленим методом суперпозицій. Для досліджень стаціонарних процесів схеми силової частини з трьома джерелами напруги створено схему заміщення і лінійну математичну модель. Наведено два варіанти розрахунків статичних характеристик, зокрема зовнішніх, регулювальних і характеристик ефективності для двох алгоритмів комутації силових вентилів. Розраховані статичні характеристики перетворювача сходяться з даними імітаційного моделювання силової схеми на комп'ютері й підтверджують правильність розрахунків. Також розглянуто динамічну модель для малих відхилень величин процесів. Для визначення концепції динамічної моделі, побудованої методом суперпозицій, розглянуто три приклади резонансних перетворювачів з множинним підключенням джерел. Динамічна модель дає можливість врахувати різні алгоритми комутації вентилів і визначити їхній вплив на динамічні характеристики перетворювача. Цінність методу суперпозицій полягає в визначенні максимальних оцінок величин та функціональних залежностей, які досяжні при прагненні до ідеальних характеристик силових елементів перетворювачів.

У шостому розділі проведено дослідження властивостей резонансного перетворювача вдосконаленим експериментально-аналітичним методом. Використання експериментально-аналітичного методу для дослідження процесів резонансного перетворювача є ефективним завдяки тому, що резонансний перетворювач представляє собою нелінійну систему з визначеною структурою. Тому для визначення математичної моделі в компактному вигляді в експериментально-аналітичний метод закладено похідні моделі як частини складного об'єкту досліджень. Паралельно створено прототип вихідної математичної моделі на основі припущень щодо структури силової частини і принципу дії перетворювача. Це є аналітична математична модель з деякими невизначеними параметрами, які визначено в ході ідентифікації похідної моделі.

Таким чином виконано параметричну ідентифікацію резонансного перетворювача з використанням імітаційних структурних моделей. Вдосконалений експериментально-аналітичний метод дає можливість побудувати динамічні моделі резонансного перетворювача як об'єкта управління на основі моделей різних типів і для нестационарних режимів роботи; обійти труднощі аналітичного визначення динамічних характеристик і передатних функцій перетворювача; отримати еквівалентні передатні функції меншого порядку, ніж передатні функції, які можуть бути отримані аналітичними методами.

У сьомому розділі проведено дослідження експериментального резонансного перетворювача потужністю 300 Вт, призначеного для перевірки результатів теоретичних досліджень та для розробки цифрового регулятора вихідних величин. Розраховано характеристики ККД та регульовальні частотні характеристики методом першої гармоніки, символічним методом і методом суперпозицій. Для підтвердження теоретичних результатів окрім натурних експериментів проводилися експерименти з імітаційними моделями резонансного перетворювача і регулятора вихідних величин. Порівняння розрахованих характеристик трьома методами з результатами експериментів показало більшу збіжність характеристик, отриманих методом суперпозицій, з експериментальними даними. Також в даному розділі представлено конструкцію цифрового адаптивного регулятора вихідної напруги, який забезпечив ліпші динамічні характеристики системи, ніж при використанні стаціонарного регулятора. Таким чином, в дисертаційній роботі розвинуто метод суперпозицій для аналізу процесів резонансних перетворювачів електроенергії, який дав можливість створити нові лінеаризовані математичні та динамічні моделі резонансних перетворювачів з різною кількістю джерел електроенергії та різними алгоритмами комутації вентилів. Запропоновано новий комбінований метод аналізу стаціонарних процесів резонансних перетворювачів на основі суміщення методів суперпозиції і припасування розв'язків для отримання функцій стаціонарного струму. Комбінований метод дав змогу визначити статичні характеристики резонансного перетворювача для різних алгоритмів комутації і робочих областей для обмеження регулюючих



величин. Теоретичний аналіз процесів резонансних перетворювачів, оснований на припущенні про умовне представлення динамічної моделі як сукупності нелінійної безінерційної частини і лінійної інерційної частини, доповнено і уточнено експериментально-аналітичним методом. В результаті отримав розвиток експериментально-аналітичний метод побудови математичних моделей в частині створення комбінованих моделей резонансних перетворювачів на основі математичних моделей підсхем і структурних моделей нелінійних елементів. Це дало можливість:

- розширити обмеження теоретичного аналізу і побудувати уточнені динамічні моделі резонансних перетворювачів;

- визначити нові залежності для узгодження фаз функції еквівалентних генераторів схеми заміщення резонансного перетворювача з фазою коливань стаціонарного струму контуру, що дали можливість встановити умови подібності розрахованих з використання математичної моделі процесів процесам силової схеми реального резонансного перетворювача;

- розробити лінеаризовані математичні і динамічні моделі, які враховують різні алгоритми комутації вентилів, і уточнені експериментально-аналітичні моделі, які непрямо враховують нелінійність елементів схем резонансних перетворювачів;

- встановити ряд нових закономірностей, корисних для проектування силових схем резонансних перетворювачів і для створення нових систем електроживлення.

**У висновку** сформульовані основні результати дослідження, які дозволили оцінити вклад автора дисертаційної роботи в подальший розвиток теорії резонансних перетворювачів з врахуванням узагальнених методів розрахунку процесів в резонансних перетворювачах і створення математичних моделей, які дають змогу розраховувати їхні статичні та динамічні характеристики.

### **Основні результати роботи й загальні висновки.**

В роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає в подальшому розвитку теорії резонансних перетворювачів з врахуванням узагальнених методів розрахунку процесів в резонансних перетворювачах і створення математичних моделей, які дають змогу розраховувати їхні статичні та динамічні характеристики.

1. На основі проведеного аналізу вдосконалено метод суперпозиції, який відрізняється новим підходом до визначення складових процесів резонансних перетворювачів на основі монотонних ступінчастих функцій і дав змогу щонайменше наполовину скоротити розрахунки в порівнянні з класичним методом розрахунків перехідних процесів.

2. Вперше запропоновано нову лінеаризовану математичну модель резонансного перетворювача для миттєвих величин, яка враховує різні алгоритми комутації вентилів при визначенні параметрів квазіусталених процесів силової схеми резонансного перетворювача.

3. 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.

4. Отримав подальший розвиток експериментально-аналітичний метод дослідження для визначення параметрів динамічної моделі резонансного перетворювача в частині скорочення невизначеності початкової експериментальної моделі за рахунок побудови структурних моделей підсхем резонансного перетворювача з врахуванням нелінійності елементів його силової схеми.

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

6. Визначено нові залежності між регулюючими величинами, параметрами силових схем і вихідними величинами резонансного перетворювача, 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.

7. З застосуванням розроблених математичних моделей було створено адаптивний цифровий регулятор вихідних величин резонансного перетворювача, з яким підвищено в 1,5 разів швидкість регулювання і збільшено запас стійкості по фазі в порівнянні з резонансним перетворювачем під керуванням автоматичного регулятора зі сталими параметрами.

8. Проведено експериментальну перевірку результатів теоретичних досліджень доводить правильність теоретичних розрахунків подібністю графіків теоретичних і експериментальних залежностей, а також збіжністю теоретичних і експериментальних даних з точністю не гірше 10% в діапазонах проведення експериментів.

### **Оцінка змісту на оформлення дисертації.**

За змістом та оформленням дисертаційна робота й автореферат відповідають встановленим вимогам з атестації кадрів щодо обсягу і структури.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 405 сторінок, у тому числі: 335 сторінок основного тексту, 253 найменування використаних джерел на 27 сторінках, 3 додатків на 6 сторінках. Основний текст дисертації містить 135 ілюстрацій та 17 таблиць.

**Зміст автореферату** відображає основні положення дисертації. Автореферат дисертації в необхідній мірі розкриває мету, завдання та отримані в роботі результати, викладений якісною технічною мовою, досить повно і точно відображає основний зміст дисертації і свідчить про достатню професійну підготовку здобувача.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні наукові теоретичні та практичні результати дисертаційних досліджень повідомлено та обговорено на 15 міжнародних науково-технічних конференціях: Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів» (ПАЕТЗ-2007, ПАЕТЗ-2013, ПАЕТЗ-2014), Миколаїв, 2007, 2013, 2014 рр.; Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених з міжнародною участю «Інформаційно-керуючі системи і комплекси ІКСК-2008», Миколаїв, 2008; Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2010, 2014, 2015, 2021, 2022, 2023 рр.; Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю "Автоматика та електротехніка-2014", Миколаїв, 2014; Міжнародна науково-технічна конференція 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, UKraine, 2016; Міжнародна науково-технічна конференція «2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)», Київ, 2021; Міжнародна науково-технічна конференція «2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology», Київ, 2022; Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» СПАЕ-2023, Миколаїв, 2023

#### **Повнота викладення основних положень дисертації в наукових працях.**

Результати дисертації опубліковано у 63 наукових роботах, у тому числі: 2 монографіях, 2 навчальних посібниках з грифом МОН України, 34 статтях у наукових фахових виданнях України, 9 патентах України на корисні моделі, 16 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.

Опубліковані роботи у повній мірі висвітлюють основний зміст, результати, висновки і рекомендації дисертації.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботі викладено авторській підхід до створення нових методів та моделей дослідження електромагнітних процесів в резонансних перетворювачах: вдосконалення методу суперпозиції; створення нової лінеаризованої математичної моделі резонансного перетворювача для миттєвих величин; розроблення нових дискретних динамічних моделей резонансного перетворювача; розвиток експериментально-аналітичного методу дослідження для визначення параметрів динамічної моделі резонансного

перетворювача; розроблення комбінованого методу аналізу квазіусталених процесів резонансного перетворювача на основі суміщення принципів суперпозиції і припасування розв'язків; створення адаптивного цифрового регулятора вихідних величин резонансного перетворювача; експериментальна перевірка результатів теоретичних досліджень.

Внесок автора в роботи, що були опубліковані у співавторстві, конкретизовано у списку публікацій.

У дисертації не використовувались матеріали кандидатської дисертації.

**Враховуючи вище наведене, слід вважати ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій такою, що відповідає вимогам щодо дисертаційних робіт, представленим на отримання наукового ступеня доктора технічних наук.**

### **Зауваження до змісту дисертації та автореферату дисертації.**

1. В розділі 2 (стор.79) до недоліків резонансних перетворювачів віднесено дорогу вартість комплектації в порівнянні з нерезонансними перетворювачами. Дозволю собі не погодитись з цим твердженням.
2. В розділі 5 (стор.285) описано використання двонаправленого симетричного керованого ключа в резонансному перетворювачі, який реалізується послідовним ввімкненням двох польових транзисторів, що призводить до збільшення опору ключа. При цьому зазначено, що «сьогодні розробляються і випускаються польові транзистори, в тому числі і високовольтні, зі зниженими опорами каналів». Однак не наведено жодних їх характеристик.
3. Є неоднозначність трактування результатів. Зокрема, в анотації «в сьомому розділі представлено конструкцію цифрового адаптивного регулятора вихідної напруги, який забезпечив ліпші динамічні характеристики системи, ніж при використанні стаціонарного регулятора». У висновках до сьомого розділу «розроблений автоматичний регулятор дозволив підвищити швидкість регулювання вихідної напруги резонансного перетворювача приблизно в 1,5 рази в порівнянні з системою зі стаціонарним лінійним регулятором».
4. На рисунку 29 автореферату представлені осцилограми вихідних напруги і струму експериментального резонансного перетворювача вихідною потужністю 300 Вт. З осцилограм не видно яка робоча частота перетворювача. Крім того незрозуміло чим обумовлена така висока нестабільність вихідної напруги – 13,5 В на холостому ході і 12,88 В при номінальному струмі навантаження 23,5 А.
5. Є деякі невідповідності в авторефераті.

**Висновок.**

Представлена дисертація Обрубова Андрія Валерійовича «Методи та моделі дослідження електромагнітних процесів резонансних перетворювачів електроенергії» за рівнем отриманих наукових результатів, змістом та обсягом є закінченою науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні, експериментальні та практичні результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему подальшого розвитку теорії резонансних перетворювачів шляхом розвитку узагальнених методів розрахунку процесів резонансних перетворювачів і створення математичних моделей, що дають змогу розраховувати їхні статичні та динамічні характеристики.

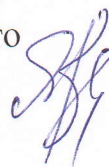
Робота актуальна, має наукову новизну, нові наукові результати і практичне значення. Результати роботи достовірні.

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи, а лише підкреслюють її багатогранність, складність, узагальнення результатів виконаних досліджень і не знижують загальної оцінки роботи.

Дисертаційна робота Обрубова А.В. за змістом, одержаними науковими результатами та їх практичним впровадженням відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її автор Обрубов Андрій Валерійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії».

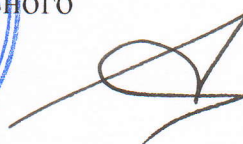
Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри радіотехнічних систем  
Тернопільського національного технічного  
університету імені Івана Пулюя



Володимир ЯСЬКІВ

Підпис Володимира ЯСЬКІВА завіряю.  
Проректор з науково-педагогічної  
роботи Тернопільського національного  
технічного університету  
імені Івана Пулюя

Степан ДЯЧУК