

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Яськів Анни Володимирівни** на тему **«Математичне моделювання високочастотних магнітних ключів для джерел вторинного електроживлення»**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

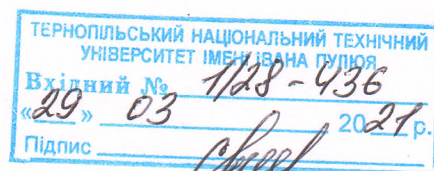
Актуальність теми виконаних досліджень.

На сьогодні функціонування переважної більшості радіоелектронних пристроїв забезпечується з допомогою імпульсних джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ). В біомедичній, космічній апаратурі, комп'ютерних та інформаційних технологіях, станціях мобільного зв'язку, транспортних системах тощо, коли необхідні високі якість та надійність електрозабезпечення, поширеним є використання багатоканальних ДВЕЖ та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження на основі високочастотних магнітних ключів (МК). Важливим етапом розробки таких пристроїв, що забезпечує її автоматизацію, є комп'ютерне імітаційне моделювання. Однак, постає проблема моделювання МК – магнітного компонента з нелінійною вихідною характеристикою. Відомі моделі В-Н характеристики МК є статичними і не придатні до інтеграції в системи автоматизованого проектування (САПР) з метою його моделювання як компонента ДВЕЖ. Оскільки провідний та непровідний стани МК змінюються в залежності від значення прикладеної до нього змінної напруги, важливо, щоб комп'ютерна модель була динамічною та якісно відображала цю залежність. МК є обмотковим виробом. В процесі проектування доводиться обирати його параметри. Автоматизація цього процесу на основі комп'ютерного моделювання вихідної характеристики МК є актуальною задачею, вирішення якої забезпечує скорочення часу розробки ДВЕЖ, сприяє розвитку нових схемотехнічних рішень.

Автор у дисертаційній роботі розв'язує актуальну наукову задачу розробки математичної та комп'ютерної моделей високочастотних МК та інтеграції останньої в обчислювальне середовище для автоматизації проектування джерел вторинного електроживлення. Представлення вихідної характеристики МК фрагментами синусоїдальних функцій та відрізками прямих зменшили складність розроблених моделей, а їх реалізація з допомогою цифрових компонентів дала можливість інтеграції в системи автоматизованого проектування радіоелектронних кіл. Таким чином, автором забезпечено автоматизацію розробки багатоканальних ДВЕЖ, ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження та інших пристроїв на основі високочастотних МК.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків і за структурою та обсягом відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій з технічних наук.



У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковою тематикою, сформульовано мету, задачі та методи дослідження, окреслено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача. Подано інформацію про апробацію, публікацію і впровадження результатів дослідження.

У *першому розділі* наведено основні результати аналітичного огляду літератури та визначено сучасний стан проблеми автоматизації розробки перетворювачів електроенергії на основі високочастотних МК, описано специфіку їх функціонування та застосування. Проаналізовано відомі моделі магнітного гістерезису та альтернативні схеми заміщення МК на предмет можливості їх використання при автоматизації проектування ДВЕЖ. Виявлено проблему інтеграції моделі магнітного компонента з нелінійною вихідною характеристикою у вигляді петлі гістерезису, а саме МК, в САПР радіоелектронних кіл, в результаті чого сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* подано математичний опис режимів роботи МК як силового ключа в ДВЕЖ. Розроблено наближену математичну модель малого сигналу високочастотного МК. На підставі аналізу стану проблеми розробки та інтеграції математичної моделі МК в САПР радіоелектронних кіл автор дослідила можливість розробки математичної моделі вихідної характеристики МК, використовуючи цифрові технології.

Здобувачем запропоновано побудувати модель вихідної характеристики МК локальним методом фрагментами синусоїдальної функції. Розроблено та обґрунтовано математичну модель вихідної характеристики МК. Петлю гістерезису умовно розбито на чотири ділянки, а оскільки зроблено припущення, що вона є симетричною (гілка, що відповідає процесу переходу МК в непровідний стан, є аналогічною до гілки, що відображає перехід МК в провідний стан, однак зміщеною ліворуч на ширину петлі гістерезису) то кожна з двох гілок поділена на два інтервали розбиття, які автором описано математично. Це втричі менша кількість інтервалів розбиття вихідної характеристики МК порівняно із відомими аналітичними моделями.

Виходячи з того, що генератор синусоїдальних функцій є елементом, модель якого міститься в стандартних бібліотеках компонентів в САПР, досліджено можливість реалізації розробленої математичної моделі вихідної характеристики МК з допомогою цифрових технологій для отримання змоги її інтеграції в САПР радіоелектронних кіл.

На основі математичної автором розроблено комп'ютерну модель вихідної характеристики МК. Завдяки зменшенню кількості інтервалів розбиття моделі магнітного гістерезису досягнуто зниження обчислювальної складності алгоритму її реалізації. При цьому вхідними параметрами моделі є загальнодоступні довідникові величини – магнітна індукція насичення та коерцитивна сила.

У *третьому розділі* здобувачем математично описано залежність між значенням прикладеної до високочастотного МК змінної напруги та

відповідною робочою точкою на його вихідній характеристиці. Цей зв'язок та розроблена модель $B-H$ характеристики лягли в основу комп'ютерної моделі МК. Автор обґрунтовує можливість її реалізації з допомогою цифрових компонентів, що містяться в стандартних бібліотеках компонентів САПР, а саме на базі цифрового мікроконтролера. Таким чином забезпечується інтеграція моделі МК у САПР радіоелектронних кіл. Зважаючи на те, що ДВЕЖ складаються з аналогових елементів, обґрунтовано вибір параметрів АЦП та ЦАП для імплементації розробленої моделі при комп'ютерному імітаційному моделюванні ДВЕЖ. Приведено алгоритм реалізації комп'ютерної моделі МК. Завдяки інтеграції розробленої комп'ютерної моделі високочастотних МК в САПР радіоелектронних кіл отримано можливість автоматизації розробки пристроїв на МК, що зменшує час їх проектування, сприяє розвитку нових схемотехнічних рішень.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено прикладним аспектам застосування розробленої моделі. На її основі спроектовано силовий інвертор, кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі та імпульсний перетворювач постійної напруги, в яких використано високочастотний МК. Інтегровано комп'ютерну модель високочастотних МК в середовище САПР MATHWORKS MATLAB 2015R.

Для верифікації розробленої комп'ютерної моделі МК отримано його експериментальна вихідна характеристика і зіставлена з модельованою.

У *додатках* наведено список публікацій Яськів А. В. за темою дисертаційного дослідження та акти впровадження результатів дисертації, а також допоміжні матеріали та проміжні результати дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше представлено модель петлі гістерезису високочастотного МК локальним методом фрагментами синусоїдальних функцій зі зміщеними фазами, що дало можливість знизити обчислювальну складність реалізації одержаної моделі у порівнянні з іншими моделями.
2. Вперше для моделі петлі гістерезису МК, представленої фрагментами синусоїдальних функцій, запропоновано та обґрунтовано реалізацію на основі цифрових елементів, що забезпечило інтеграцію математичної моделі у наявні обчислювальні середовища.
3. Вперше на основі запропонованої математичної моделі петлі гістерезису МК розроблено і обґрунтовано комп'ютерну модель високочастотних МК, що дало можливість інтегрувати її у бібліотеку компонентів САПР.
4. Набули подальшого розвитку середовища для комп'ютерного моделювання джерел вторинного електроживлення на основі МК, в яких, на відміну від існуючих, інтегровано реалізацію комп'ютерної моделі МК, що забезпечило автоматизацію процесів проектування ДВЕЖ.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Приведені в дисертації результати дослідження є обґрунтованими. За основу викладених наукових положень автором взято принципи теорії

електричних і магнітних кіл при розробці математичної моделі вихідної характеристики високочастотних магнітних ключів, а також методи комп'ютерного моделювання схем електричних кіл при розробці та інтеграції комп'ютерної моделі МК в САПР радіоелектронних кіл. В цілому наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими.

Достовірність отриманих результатів та висновків.

Достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, на яких ґрунтується побудова математичної моделі МК. Також достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджено результатами експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання процесів перемагнічення високочастотних МК, впровадженням розробок в практику, а також збігом частини результатів моделювання з відомими, які опубліковано в науковій літературі.

Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.

В роботі вирішено актуальне наукове завдання розробки математичної моделі високочастотних МК та її інтеграції в САПР радіоелектронних схем. Це забезпечило автоматизацію проектування ДВЕЖ на основі МК, що скоротило тривалість процесу їх розробки, а також сприяє розвитку нових схемотехнічних рішень в галузі проектування перетворювачів електричної енергії.

Практична цінність одержаних результатів та їх подальше використання.

Практична цінність результатів дослідження полягає у створенні комп'ютерної моделі МК у вигляді програмної реалізації, що може бути інтегрована в широке коло існуючих САПР для автоматизації процесів проектування перетворювачів електроенергії.

Практичне значення дисертаційної роботи підтверджено впровадженням результатів дослідження в державному науково-технічному підприємстві «Техас-К» при розробці стабілізатора постійної напруги для електроживлення антенного комплексу та в навчальному процесі кафедри радіотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя. Результати роботи можуть бути використані в організаціях та підприємствах, які займаються проектуванням, виробництвом та експлуатацією радіоелектронної апаратури.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях.

Наукові і практичні результати дисертації опубліковані загалом у 28 наукових працях. З них, - 1 стаття у фаховому періодичному закордонному виданні, що індексується наукометричною базою Scopus та 4 статті – у фахових періодичних виданнях України. Результати дисертаційного дослідження також підтверджені патентами України (5 на корисну модель і 5 на винахід) і апробовані на 11 міжнародних та 3 Всеукраїнських конференціях.

У наукометричній базі SCOPUS представлено 3 публікації автора, що свідчить про визнання цінності результатів для міжнародної наукової спільноти. Варто відзначити, як позитивний момент, що періодичне фахове закордонне видання, в якому опубліковані результати дисертаційного дослідження, згідно з класифікацією SCImago Journal and Country Rank, належить до третього квартилю.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

Автореферат дисертаційної роботи у повній мірі відображає її основний зміст.

Відповідність дисертаційної роботи обраній спеціальності.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання і обчислювальні методи, зокрема, формулі спеціальності, оскільки стосується розробки *засобів математичного та комп'ютерного моделювання, призначених для використання при створенні (а саме для автоматизації процесу розробки) джерел вторинного електроживлення на основі високочастотних магнітних ключів.* Дисертація відповідає напрямкам спеціальності, оскільки *створено нову комп'ютерну модель високочастотних МК, включаючи її алгоритмічну організацію, що враховує особливості задачі автоматизації проектування пристроїв на основі МК. Здійснено підготовку первинної інформації, визначено склад та структуру моделі, проведено її налаштування та верифікацію.* Реалізація розробленої моделі МК з допомогою цифрових технологій дозволила її інтеграцію в системи автоматизованого проектування радіоелектронних кіл, таким чином забезпечуючи автоматизацію проектування джерел вторинного електроживлення на МК.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Середовище pSpice/ pSpice Model Editor дозволяє автоматично визначати параметри моделі Джілса-Атертона за експериментально вимірними значеннями напруженості магнітного поля та відповідними до них значеннями магнітної індукції і початковою магнітною проникністю. Проте, автором дисертації у першому розділі стверджується про складність інтеграції існуючих моделей МК в САПР.

2. Запропонована математична модель петлі гістерезису високочастотного МК побудована лекальним методом двома фрагментами синусоїдальних функцій зі зміщеними фазами, а не на основі розкладу сигналів сили струму та напруги на виході МК в тригонометричний ряд Фур'є, як стверджує автор.

3. Згідно логіки викладення матеріалу, частину другого розділу, що стосується побудови комп'ютерної моделі, доцільно було б розглядати після представлення математичної моделі вихідної характеристики МК.

4. Доцільно було б розглянути можливість інтеграції розробленої комп'ютерної моделі петлі гістерезису МК у бібліотеку компонент більш спеціалізованих САПР, наприклад, таких як рSpice.

5. У тексті дисертаційної роботи зустрічають неточності, різні стилі написання та позначення у формулах, невідповідність до стандарту при оформленні блок-схем тощо.

Зазначені зауваження та недоліки є не принциповими і суттєво не знижують загального позитивного враження від поданої роботи.

Загальні висновки

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертація Яськів А.В. на тему «Математичне моделювання високочастотних магнітних ключів для джерел вторинного електроживлення» є завершеною науковою працею, у якій отримані нові наукові і практичні результати, що вирішують важливу наукову задачу розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграції в обчислювальне середовище для автоматизації проектування джерел вторинного електроживлення на МК.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор Яськів Анна Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання і обчислювальні методи.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Декан факультету
комп'ютерних інформаційних технологій
Західноукраїнського національного університету,
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор



Микола ДИВАК

