

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Анни Володимирівни Яськів на тему: "Математичне моделювання  
високочастотних магнітних ключів для джерел вторинного електроживлення",  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

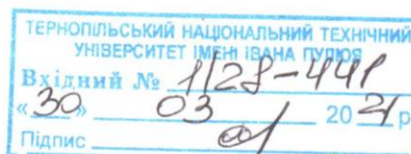
### Актуальність теми дисертації.

Щоб забезпечити високу надійність, коефіцієнт корисної дії, якість вихідних струмів та напруг, питому потужність для електроживлення радіоелектронних пристроїв використовують багатоканальні джерела вторинного електроживлення (далі – ДВЕЖ) та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження. Для досягнення вище зазначених характеристик ДВЕЖ при спрощенні їх схемотехнічних рішень використовують високочастотні магнітні ключі – радіоелектронні компоненти з нелінійними властивостями, що складаються з осердя з магнітом'якого матеріалу, обмотки навколо нього та розмагнічуючого діода. При математичному та комп'ютерному моделюванні для створення систем автоматизованого проектування (далі – САПР) радіоелектронних кіл, зокрема, багатоканальних джерел живлення та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження, існує проблема моделювання компонента з магнітним гістерезисом для інтеграції його у бібліотеку моделей САПР. Останні не працюють з розрахунком параметрів магнітних полів і дають можливість здійснювати моделювання тільки дискретних електричних компонентів, що значно ускладнює проектування ДВЕЖ. Комп'ютерне моделювання є важливим етапом розробки ДВЕЖ і забезпечує автоматизацію підбору параметрів їх компонентів, чим скорочує час та знижує вартість розробки.

Тому актуальною є наукова задача розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграція в обчислювальне середовище для автоматизації проектування джерел вторинного електроживлення. Розв'язання цієї наукової задачі забезпечить скорочення тривалості розробки ДВЕЖ на основі магнітних ключів з одночасним зниженням її складності та вартості, а також сприятиме розвитку нових схемотехнічних рішень в галузі проектування перетворювачів електроенергії на магнітних ключів.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації повною мірою обґрунтовані, оскільки логічно випливають із результатів, отриманих за допомогою методів теорії електричних та магнітних кіл, методів апроксимації при розробці математичної моделі вихідної характеристики високочастотних магнітних ключів, методів комп'ютерного моделювання схем електричних кіл, методів теорії кіл і сигналів при розробці та інтеграції комп'ютерної моделі магнітних ключів в САПР радіоелектронних кіл, методів математичної статистики при обробці експериментальних даних для верифікації розробленої комп'ютерної моделі високочастотних магнітних ключів.



Достовірність отриманих результатів підтверджують впровадження у державному науково-технічному підприємстві та навчальний процес та науково-дослідну роботу вищих навчальних закладів технічного профілю.

### **Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження**

1. Запропоновано та обґрунтовано представлення моделі вихідної характеристики магнітних ключів фрагментами синусоїдальних функцій лекальним методом. Це дозволило описати запропоновану математичну модель синусоїдальними та лінійними функціями на двох інтервалах розбиття, що забезпечило зменшення кількості інтервалів розбиття для представлення вихідної характеристики магнітних ключів у 3 рази в порівнянні з відомими моделями, де їх мінімальна кількість становить 6, і в сукупності знизити часову складність реалізації запропонованої моделі.

2. На підставі розробленої математичної моделі вихідної характеристики магнітних ключів обґрунтовано та розроблено комп'ютерну модель реалізації цієї характеристики у вигляді цифрового мікроконтролера, що забезпечило інтеграцію цієї моделі в існуючі САПР. Така інтеграція забезпечує скорочення часу проектування ДВЕЖ за рахунок автоматизації процесу вибору параметрів високочастотних магнітних ключів.

3. Удосконалено середовище для комп'ютерного моделювання пристроїв на основі магнітних ключів, в якому, на відміну від існуючого, інтегровано комп'ютерну модель високочастотних магнітних ключів у бібліотеку компонентів САПР. Обґрунтовано вибір параметрів АЦП напруги, прикладеної до магнітних ключів, розраховано методичну похибку моделювання. Таким чином забезпечено автоматизацію проектування ДВЕЖ на основі високочастотних магнітних ключів, а саме багатоканальних перетворювачів напруги та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження.

### **Значущість отриманих результатів для науки і практики**

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграції в САПР радіоелектронних кіл за рахунок представлення математичної моделі вихідної характеристики магнітних ключів фрагментами синусоїдальних функцій та її комп'ютерної реалізації з допомогою цифрових технологій. Це забезпечило автоматизацію проектування ДВЕЖ на основі магнітних ключів, що зменшило часову складність процесу їх розробки, а також сприяє розвитку нових схемотехнічних рішень і є актуальним та важливим, практично корисним результатом роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в державному науково-технічному підприємстві "Техас-К" та в навчальному процесі кафедри радіотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

### **Повнота викладення результатів у опублікованих матеріалах**

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 28-и наукових працях. З них 1 стаття у закордонному науковому періодичному виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, 4 статті у наукових фахових виданнях України в галузі технічних наук, 5 патентів України на корисну модель, 5 патентів України на винахід та 13 публікацій у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських наукових і науково-технічних конференцій, дві з яких зареєстровано в наукометричних базах даних Scopus

та Web of Science. Рівень та кількість публікацій здобувача відповідають вимогам до кандидатських дисертацій в Україні.

### **Структура та зміст дисертації**

Дисертація містить 166 сторінок, з яких 111 сторінок основного тексту (45 рисунків та 3 таблиці). Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 7 додатків та 143 найменувань списку літератури. За структурою та обсягом робота відповідає вимогам до дисертаційних робіт в Україні.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів. Подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та наявні публікації.

У **першому розділі** наведено основні результати аналітичного огляду літератури та визначено сучасний стан проблеми автоматизації розробки багатоканальних ДВЕЖ та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження на основі високочастотних магнітних ключів – магнітних компонентів з нелінійною вихідною характеристикою у вигляді петлі гістерезису, описано специфіку їх функціонування та застосування. Виявлено, що САПР радіоелектронних кіл працюють з моделями дискретних електричних компонентів і розрахунком виключно електричних параметрів. Проведено аналіз математичних моделей магнітного гістерезису Прайзаха, Джілса-Атертона, Дж. Чана. Аналітична модель гістерезису А. Ніколаїде характеризується порівняно нижчою обчислювальною складністю, однак не призначена для моделювання магнітних ключів в САПР радіоелектронних кіл. Виявлено проблему інтеграції моделі високочастотного магнітних ключів у САПР радіоелектронних кіл. В завершальній частині розділу сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** детально описано режими роботи магнітних ключів як комутаційного компонента в ДВЕЖ. На підставі аналізу стану проблеми автоматизації проектування ДВЕЖ на основі магнітних ключів, а саме розробки та інтеграції їх математичної моделі в САПР радіоелектронних кіл, досліджено можливість розробки математичної моделі вихідної характеристики магнітних ключів, використовуючи цифрові технології.

Розглянуто можливість моделювання нелінійних електричних схем рядами Вольтера. Кількість доданків ряду  $i$ , відповідно, їх степінь визначаються рівнем точності моделювання, якого потрібно досягнути. Вперше для моделі вихідної характеристики магнітних ключів запропоновано та обґрунтовано представлення у вигляді розкладу сигналів сили струму і напруги на виході магнітних ключів в тригонометричний ряд Фур'є, що дозволило представити гістерезис струму та напруги на виході магнітних ключів як суму синусоїд кратних частот та амплітуд. Запропоновано і досліджено підхід до моделювання вихідної характеристики магнітних ключів лекальним методом фрагментами функції  $\sin$  для однієї заданої частоти. Зважаючи на те, що функція  $\sin$  є базисною і ортогональною, моделювання з додаванням кількох гармонік ряду Фур'є здійснюватиметься аналогічно.

Досліджено можливість моделювання вихідної характеристики магнітних ключів з допомогою цифрових технологій. На основі розробленої математичної моделі вихідної характеристики магнітних ключів створено її комп'ютерну модель,

реалізовану з допомогою цифрових технологій. На порядок знижено обчислювальну складність алгоритму реалізації комп'ютерної моделі магнітного гістерезису за рахунок зменшення кількості інтервалів її розбиття до двох, що втричі менше, ніж в аналітичній моделі магнітного гістерезису А. Ніколаїде.

У **третьому розділі** на основі розробленої комп'ютерної моделі вихідної характеристики магнітних ключів створено комп'ютерну модель магнітних ключів та інтегровано її у САПР радіоелектронних кіл.

Обґрунтовано алгоритм комп'ютерного моделювання магнітних ключів. Оскільки ДВЕЖ на основі магнітних ключів є аналоговими пристроями, то використання моделі на основі цифрових компонентів в САПР потребувало аналого-цифрового перетворення сигналу змінної напруги, прикладеної до магнітних ключів, та цифро-аналогового перетворення значення сигналу вихідної напруги магнітних ключів.

Цифрову модель магнітних ключів з вихідною характеристикою у вигляді петлі гістерезису з подальшою інтеграцією її в програмне забезпечення реалізовано на базі мікроконтролера, наприклад, ADuC8052. Цей мікроконтролер має вбудовані АЦП та ЦАП, регістри пам'яті тощо, його модель міститься в стандартних бібліотеках компонентів САПР радіоелектронних кіл.

Для підвищення функціональних можливостей наближення форми вихідної характеристики магнітних ключів (петлі гістерезису) використано її поточкове наближення за визначеним критерієм.

У **четвертому розділі** розроблено нові схемотехнічні рішення ДВЕЖ на високочастотних магнітних ключів, а саме силовий інвертор, кероване джерело живлення з виходом на змінному струмі, в основу роботи яких покладено режим роботи магнітних ключів по повній петлі гістерезису. Для верифікації розробленої комп'ютерної моделі магнітних ключів важливим завданням є отримання його експериментальної вихідної характеристики. З цією метою побудовано й досліджено експериментальне електричне коло з високочастотним магнітним ключем.

На підставі розробленої математичної моделі вихідної характеристики магнітних ключів обґрунтовано та розроблено комп'ютерну модель реалізації цієї характеристики у вигляді цифрового мікроконтролера, що забезпечило інтеграцію цієї моделі в існуючі САПР. Така інтеграція забезпечує скорочення часу проектування ДВЕЖ за рахунок автоматизації процесу вибору параметрів високочастотних магнітних ключів. Також наведено результати експериментального запису петлі гістерезису магнітних ключів.

Розроблено схемотехнічні рішення стабілізаторів постійної напруги, де використано переключення магнітних ключів по частковій петлі гістерезису. Останні впроваджені в державному науково-технічному підприємстві "Техас-К".

У **додатках** містяться: список публікацій Анни Володимирівни Яськів за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації; базові структурні схеми джерел вторинного електроживлення на транзисторні та магнітні ключі; інформаційний листок на дослідний зразок типу ОЛ 50×36×35; блок-схему алгоритму числення комп'ютерної моделі високочастотних магнітних ключів; лістинг програми реалізації алгоритму моделювання високочастотних магнітних ключів; осцилограми,

що демонструють залежність вихідної характеристики високочастотних магнітних ключів від частоти комутації; акти впровадження дисертаційного дослідження.

### **Оформлення дисертації та автореферату.**

Дисертаційна робота написана грамотно. Матеріали досліджень подано логічно, послідовно та доказово. Оформлення автореферату та дисертації повністю відповідає вимогам, рекомендованим Міністерством освіти і науки України. Текст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи, а дисертація – паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1. Основними параметрами запропонованої апроксимації в дисертаційній роботі є певна кількість членів тригонометричного полінома і базова частота. У роботі доцільно було провести дослідження, як залежить вплив цих параметрів на точність апроксимації.
2. Спектр реального сигналу є необмеженим, тому верхня частота спектру вибирається з наперед заданою умовою, але ця умова у роботі не задана.
3. Відомо, що перевагами апроксимації у вигляді нетригонометричних функцій є менша кількість невідомих параметрів. На мою думку слід було порівняти вибраний підхід з даної точки зору.
4. Рис. 2 і рис. 4 автореферату, а також рис. 2.11 і рис. 3.6 у дисертаційній роботі є загальновідомі. Для чого вони наведені?
5. В авторефераті рис. 8 і в дисертаційній роботі рис. 4.12 не добре підписаний. Потрібно писати середнє значення, а не оцінка математичного сподівання.
6. У роботі написано про співпадіння модельованих процесів з реальними при відносній максимальній похибці  $\varepsilon \leq 17,2\%$ , що перевершує результати, отримані при застосуванні існуючих математичних моделей. Виникає питання, що заважає зменшити дану похибку?
7. У дисертаційній роботі пропущено рис. 4.14.
8. У тексті дисертаційної роботи подекуди зустрічаються граматичні помилки та стилістичні неточності.

Висловлені зауваження не впливають на високу позитивну характеристику дисертаційної роботи, не зменшують її актуальність, наукову та практичну цінність дисертаційних досліджень.

### **Загальні висновки**

Дисертаційна робота Анни Володимирівни Яськів на тему “Математичне моделювання високочастотних магнітних ключів для джерел вторинного електроживлення” є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальне завдання розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграції в обчислювальне середовище для автоматизації проектування багатоканальних джерел вторинного електроживлення та джерел вторинного електроживлення з високим рівнем струму навантаження, що має істотне значення при розробці перетворювачів електроенергії на магнітні ключі.



Наукові публікації здобувача повністю відображають основні результати дисертаційного дослідження.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення поставлених наукових та практичних задач, новизною і ступінню обґрунтованості отриманих результатів, практичних висновків та рекомендацій робота задовольняє вимогам, зокрема (п. 9, 11, 12 щодо кандидатських дисертацій) "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. № 567 (зі змінами), а її автор, Анна Володимирівна Яськів заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

**Офіційний опонент,  
завідувач відділу методів та засобів  
відбору й обробки діагностичних сигналів  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник**

 **Р. М. Юзефович**

