

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ЯСЬКІВ АННА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.318.4+519.688

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ
КЛЮЧІВ ДЛЯ ДЖЕРЕЛ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор –
Яворський Богдан Іванович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
професор кафедри радіотехнічних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор –
Дивак Микола Петрович,
Західноукраїнський національний університет,
декан факультету комп'ютерних інформаційних
технологій, м. Тернопіль;

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник –
Юзефович Роман Михайлович,
Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка НАН
України,
завідувач відділу методів та засобів відбору та обробки
діагностичних сигналів, м. Львів.

Захист відбудеться « 9 » квітня 2021 р. о 11 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий « 4 » березня 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Для електроживлення радіоелектронних пристроїв широко використовують багатоканальні джерела вторинного електроживлення (ДВЕЖ) та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження, що повинні забезпечити високі надійність та коефіцієнт корисної дії, якість вихідних струмів та напруг, питому потужність. Застосування транзисторних ключів в складі таких ДВЕЖ вимагає складних схем керування і не дає можливості досягнути заданих характеристик. Тому для забезпечення вище зазначених характеристик ДВЕЖ при спрощенні їх схемотехнічних рішень використовують високочастотні магнітні ключі (МК) – радіоелектронні компоненти з нелінійними властивостями, що складаються з осердя з магнітом'якого матеріалу, обмотки навколо нього та розмагнічуючого діода. Комп'ютерне моделювання є важливим етапом розробки ДВЕЖ, що забезпечує автоматизацію підбору параметрів їх компонентів, чим скорочує час та знижує вартість розробки.

Комп'ютерне моделювання в системах автоматизованого проектування — САПР (CAD – computer-aided design) радіоелектронних кіл забезпечує автоматизацію процесу розробки ДВЕЖ. Однак, при математичному та комп'ютерному моделюванні для створення САПР радіоелектронних кіл, зокрема, багатоканальних джерел живлення та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження, існує проблема моделювання компонента з магнітним гістерезисом, а саме МК, 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.

На сьогодні відомі САПР, які призначені для розрахунку параметрів магнітних полів (ELCUT, ANSYS Maxwell, MAFIA). Інтеграції моделей магнітного гістерезису Джілса–Атертона та Джона Чана в САПР (pSim та LTspice IV відповідно) стосуються радіоелектронних кіл з магнітними компонентами при лінійному включенні. Модель магнітного гістерезису Прайзаха та моделі магнітних компонентів з використанням штучних нейронних мереж (Konieczny J., Dobrzanski L. A., Tomiczek B., Traska J.) характеризуються високою обчислювальною складністю, і потребують інтеграції в САПР радіоелектронних кіл. Відома інтеграція аналітичної моделі магнітного гістерезису магнітом'яких матеріалів (Nicolaide A.) в САПР LabVIEW (Motoasca S., Scutaru G.), однак вона розроблена виключно для дослідження магнітного поля і не призначена для використання при проектуванні електричних кіл. Альтернативно використовують еквівалентні схеми заміщення МК, що складаються з дискретних електричних компонентів (Edry D., Ben-Yaakov S., Austrin L., Ribbenfjard D., Engdahl G.). Проте, складно оптимізувати їх параметри.

Виходячи з вище викладеного, 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 МК з одночасним зниженням її складності та вартості, а також сприятиме розвитку нових схмотехнічних рішень в галузі проектування перетворювачів електроенергії на МК.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалося відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України (Наказ Міністерства освіти і науки України №1466 від 28.12.2018р. «Тематика наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Міністерства освіти і науки на 2019-2021 роки», пп. 29, 36, 37, 42), а також згідно з науковими темами ДІ 188-12 «Розробка математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та аутентифікації людини за циклічними біомедичними сигналами», інвентарний номер держ. реєстрації 0112U002203, 2012 р.; ДІ 189-12 «Методи та математичні моделі високоякісного енергетичного забезпечення захищених комп'ютерних систем», інвентарний номер держ. реєстрації 0112U002204, 2012 р.; ДФК 195-12 «Високоєфективні джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності», інвентарний номер держ. реєстрації 0112U005146, 2012 р.; №464-18 «ДКР з розроблення та виготовлення ракетно-космічної техніки. Удосконалення наземного інформаційного комплексу. Модернізація пункту прийому інформації ППП-1.7Д», інвентарний номер держ. реєстрації 0118U004721 (РК), 2018 р.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграція в обчислювальне середовище для автоматизації процесів проектування джерел вторинного електроживлення.

Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких задач:

- 1) провести аналітичний огляд існуючих математичних моделей магнітних радіоелектронних компонентів з нелінійними властивостями для дослідження можливості їх інтеграції в САПР радіоелектронних кіл;
- 2) розробити математичну модель вихідної характеристики високочастотного МК, придатну для інтеграції в САПР радіоелектронних кіл;
- 3) розробити комп'ютерну модель високочастотного МК;
- 4) інтегрувати комп'ютерну модель високочастотного МК в бібліотеку компонентів САПР радіоелектронних кіл;
- 5) провести експериментальний відбір та опрацювання сигналів струму та напруги МК та його комп'ютерне моделювання для верифікації математичної моделі вихідної характеристики МК.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення параметрів електричної енергії високочастотними магнітними ключами джерел вторинного електроживлення.

Предмет дослідження: математична модель високочастотних магнітних ключів для отримання змоги інтеграції в системи автоматизованого проектування, що використовуються при розробці джерел електроживлення.

Методи дослідження Методи теорії електричних та магнітних кіл та методи апроксимації при розробці математичної моделі вихідної характеристики високочастотних магнітних ключів. Методи комп'ютерного моделювання схем електричних кіл, методи теорії кіл і сигналів при розробці та інтеграції комп'ютерної моделі МК в САПР радіоелектронних кіл. Методи математичної

статистики при обробці експериментальних даних для верифікації розробленої комп'ютерної моделі високочастотних МК.

Для програмної реалізації алгоритму моделювання високочастотних магнітних ключів використано пакет прикладних програм MATHWORKS MATLAB 2015R.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 1) вперше представлено модель вихідної характеристики МК локальним методом фрагментами синусоїдальних функцій на основі розкладу сигналів сили струму та напруги на виході МК в тригонометричний ряд Фур'є, що дало можливість знизити обчислювальну складність реалізації одержаної моделі у порівнянні з іншими моделями;
- 2) вперше для моделі вихідної характеристики МК, представленої фрагментами синусоїдальних функцій, запропоновано та обґрунтовано її реалізацію на базі цифрових елементів, що забезпечило інтеграцію математичної моделі у обчислювальні середовища;
- 3) вперше на основі запропонованої математичної моделі вихідної характеристики МК розроблено і обґрунтовано комп'ютерну модель високочастотних МК, що дало можливість її інтегрувати у бібліотеку компонентів САПР;
- 4) набуло подальшого розвитку середовище для комп'ютерного моделювання пристроїв на основі МК, в якому, на відміну від існуючого, інтегрована реалізація комп'ютерної моделі МК, що забезпечило автоматизацію процесів проектування ДВЕЖ.

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

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в державному науково-технічному підприємстві «Техас-К» та в навчальному процесі кафедри радіотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя.

Акти впровадження наведено в Додатку Ж до дисертації.

Особистий внесок. Основні наукові результати, що становлять суть дисертації, отримані здобувачем самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: у працях [1, 22] – виведення та обґрунтування математичної моделі високочастотних магнітних ключів для використання при проектуванні джерел вторинного електроживлення; у праці [2] – розробка та обґрунтування представлення моделі В-Н характеристики матеріалу осердя МК локальним методом фрагментами синусоїдальних функцій, розробка, обґрунтування та інтеграція комп'ютерної моделі МК у бібліотеку компонентів САПР; у працях [4, 24] – обґрунтування та дослідження використання МК у високочастотному

силовому інверторі, що дало змогу сформулювати припущення, покладені в основу розробленої математичної моделі МК для застосування в системах автоматизованого проектування радіоелектронних кіл; у працях [5, 7, 25, 26] – обґрунтування використання МК при організації паралельної роботи ДВЕЖ та в ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження, що дозволило сформулювати припущення, покладені в основу розроблених математичної моделі В-Н характеристики осердя МК та математичної моделі МК; у праці [6] – обґрунтування застосування і дослідження роботи МК у поєднанні з синхронним випрямлячем; у працях [8, 13, 23] – дослідження роботи МК у стабілізаторі напруги з високим рівнем струму навантаження; у працях [9, 10, 14, 15] – обґрунтування нових схемотехнічних рішень ДВЕЖ, в яких основною вихідною характеристикою МК є часткова петля гістерезису; у працях [11, 12, 16, 17] – обґрунтування нових схемотехнічних рішень ДВЕЖ, в яких основною вихідною характеристикою МК є повна петля гістерезису.

Співавтори праць не заперечують персонального внеску здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати проведених у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на 11 міжнародних та 3 всеукраїнських конференціях, а саме на Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і техніка: виклики стогодення», м.Київ, 2013 р.; Міжнародній науковій конференції “Baltic University Programme Ph.D. Students Conference Interdisciplinary – Multicultural - International” (м. Рогув, Польща, 2013 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (м. Тернопіль, 2013 р., 2015 р., 2017 р.); 10th International Conference ELEKTRO 2014 (м. Раєцке-Теплице, Словаччина, 2014 р.); Baku World Forum of Young Scientists 2014 (м. Баку, Азербайджан, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (м. Тернопіль, м. Яремче, 2015 р., 2018 р.); Baltic University Programme 4th Ph.D. Students Conference Interdisciplinary-Multicultural – International (м. Рогув, Польща, 2016р.); International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT) (м. Чеське Будейовіце, Чехія, 2018 р., 2019 р.); XV- ій Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 100-річчю Національної академії наук України. Проблеми сучасної електротехніки-2018, (м. Київ, 2018 р.); IV-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій», присвяченій 80-річчю з дня народження професора Я. І. Проця (м. Тернопіль, 2019р.).

В цілому робота доповідалася на наукових семінарах в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (м. Тернопіль).

Публікації. Основний зміст і результати дисертації опубліковані в 28 наукових працях, з них 1 стаття в міжнародному періодичному виданні, що входить в міжнародні наукометричні бази Scopus та Compendex, 4 статті у наукових фахових виданнях України в галузі технічних наук (4 з яких у виданнях, зареєстрованих в наукометричних базах даних з Міжнародним індексом цитування Google Scholar [2-5], Index Copernicus [2, 3], Crossref [5], OpenUkrainianCitationIndex [5]), 5 патентів України на корисну модель, 5 патентів України на винахід та 13 публікацій у

матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських наукових та науково-технічних конференцій, дві з яких зареєстровано в наукометричних базах з Міжнародним індексом цитування Scopus [6, 7] та Web of Science[7].

Праці [3, 18-21, 27, 28] опубліковано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 166 сторінок, з яких 111 сторінок основного тексту, 7 додатків на 16 сторінках, список літератури налічує 143 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету та задачі, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, окреслено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок дисертанта, розкрито питання апробації, публікації і впровадження результатів дослідження.

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 МК - 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. Математичні моделі магнітного гістерезису Прайзаха, Джілса-Атертона, Дж. Чана, моделі на основі штучних нейронних мереж та еквівалентні схеми заміщення МК характеризуються високою обчислювальною складністю, є емпіричними і статичними, моделюють перехідні процеси в МК тільки для окремого конкретного випадку. Аналітична модель гістерезису А. Ніколаїде характеризується порівняно нижчою обчислювальною складністю, однак не призначена для моделювання МК в САПР радіоелектронних кіл. Виявлено проблему інтеграції моделі високочастотного МК в САПР радіоелектронних кіл. В завершальній частині розділу сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

Другий розділ стосується вибору напряму досліджень. Детально математично описано режими роботи МК як комутаційного компонента в ДВЕЖ. На підставі аналізу стану проблеми автоматизації проектування ДВЕЖ на основі МК, а саме розробки та інтеграції їх математичної моделі в САПР радіоелектронних кіл, досліджено можливість розробки математичної моделі вихідної характеристики МК, 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. Однак, розв'язок рівнянь вище третього порядку є складним як з часової так і з обчислювальної точок зору. Вперше для моделі вихідної характеристики МК запропоновано та обґрунтовано представлення у вигляді розкладу сигналів сили струму і напруги на виході МК в тригонометричний ряд Фур'є. Це дозволило представити гістерезис струму та

напруги на виході МК як суму синусоїд кратних частот та амплітуд. Запропоновано і досліджено підхід до моделювання вихідної характеристики МК локальним 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. Петлю гістерезису умовно розбито на чотири ділянки (рис. 1). Запропоновано ділянки 2-3 та 4-1 змоделювати фрагментами синусоїдальної функції, а ділянки 1-2 та 3-4 – відрізками прямих.

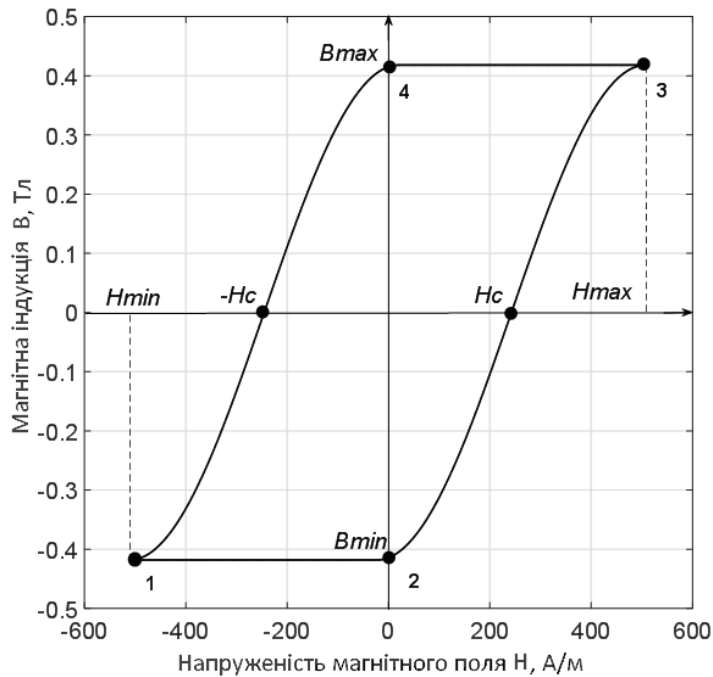


Рис. 1. Ключові робочі точки вихідної характеристики МК

У запропонованій моделі зроблено наступні припущення:

- 1) висхідна та низхідна гілки вихідної характеристики МК (B-H характеристики) відображаються монотонно зростаючою та спадною функціями відповідно;
- 2) вихідна характеристика МК є симетричною: ділянка, що відповідає процесу переходу МК в непровідний стан (4-1), є аналогічною до ділянки, що відображає перехід МК в провідний стан (2-3), однак зміщеною ліворуч на ширину петлі гістерезису $2H_c$;
- 3) для повної петлі гістерезису на ділянці 1-2 (рис. 1) поточне значення магнітної індукції $B_n = B_{min}$, а на ділянці 3-4 $B_n = B_{max}$.

Досліджено можливість моделювання вихідної характеристики МК з допомогою цифрових технологій. Функція \sin описується різницеvim рівнянням другого порядку, схематичне представлення якого наведено на рисунку 2. У кожній САПР електричних кіл є генератори синусоїдальних сигналів. Реалізація моделі вихідної характеристики МК з допомогою цифрових технологій дає змогу до її інтеграції в САПР радіоелектронних кіл.

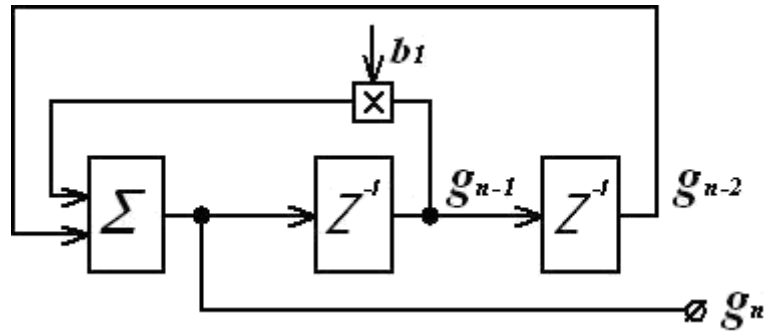


Рис. 2. Схема цифрового генератора синуса
Сигнал на виході суматора є синусоїдальним при початкових умовах

$$g(0) = g_0 \sin \theta, \quad (1)$$

$$g(1) = g_0 \sin(\theta + \theta_b) \quad (2)$$

і описується рівнянням

$$g(n) = g_0 \sin(n \cdot \theta + \theta_b). \quad (3)$$

Тут θ – крок дискретизації сигналу, θ_b – початкова фаза коливань:

$$\theta = \arccos \alpha, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\cos 2\pi f}{F}, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт, що визначає частоту генерації пристрою, f — частота генератора, F — частота дискретизації;

$$\theta = 2\pi \frac{f}{F}; \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{T_d}, \quad (7)$$

де T_d – період дискретизації.

Розроблено та обґрунтовано математичну модель вихідної характеристики МК. Математично висхідну (ділянки 1-2, 2-3) та низхідну (ділянки 3-4, 4-1) гілки В-Н характеристики матеріалу осердя МК описано наступним чином:

$$1-2: \begin{cases} g_n = g_{n-1}, \\ g_n = B_{\min}; \end{cases} \quad H_n = \overline{H_{\min}, H_{\min} + 2H_c}, B_n = B_{\min}, \quad (8)$$

$$2-3: g_n > g_{n-1}; \quad H_n = \overline{H_{\min} + 2H_c, H_{\max}}, B_n = k \sin(2\pi f n T_d + \varphi_1), \quad (9)$$

$$3-4: \begin{cases} g_n = g_{n-1}, \\ g_n = B_{\max}; \end{cases} \quad H_n = \overline{H_{\max}, H_{\max} - 2H_c}, B_n = B_{\max}, \quad (10)$$

$$4-1: g_n < g_{n-1}; \quad H_n = \overline{H_{\max} - 2H_c, H_{\min}}, B_n = k \sin(2\pi f n T_d + \varphi_2), \quad (11)$$

де g – цифровий код електромагнітних змінних, $n = \overline{1, N}$ — індекс цифрових кодів електромагнітних змінних, решта індексів є цифровими кодами відповідних констант. H_{min} , H_{max} - відповідно мінімальне та максимальне значення напруженості магнітного поля. H_c - коерцитивна сила. B_{min} , B_{max} – відповідно, мінімальне та максимальне значення магнітної індукції. k – амплітуда сигналу, для повної петлі гістерезису $k=B_{max}$. З метою спрощення у цій моделі зроблено припущення, що магнітна індукція насичення $B_s = B_{max}$, тоді як в реальних фізичних системах B_{max} зазвичай дорівнює значенню магнітної індукції при $H=5H_c$.

На основі розробленої математичної моделі вихідної характеристики МК 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 МК створено комп'ютерну модель МК та інтегровано її у САПР радіоелектронних кіл.

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



Рис. 3. Функціональна схема експерименту для верифікації комп'ютерної моделі магнітного ключа

На схемі рисунку 3 використано такі позначення: Γ – генератор змінної напруги, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, МК – цифрова модель магнітного ключа, реалізована на мікроконтролері, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, O – осцилограф, $U_{вх}$ – змінна напруга, прикладена до АЦП; $\hat{U}_n^{вх}$, $\hat{U}_n^{вих}$ - послідовність двійкових кодів значень напруги після АЦП та на вході ЦАП відповідно; $n \equiv nT_d$, $n=1, 2, 3, \dots, T_d$ — період дискретизації, $U_{вих}$ – напруга на виході ЦАП.

Цифрову модель МК з вихідною характеристикою у вигляді петлі гістерезису з подальшою інтеграцією її в програмне забезпечення є змога реалізувати 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.

Обґрунтовано вибір параметрів АЦП напруги $U_{вх}$ (рис. 4).

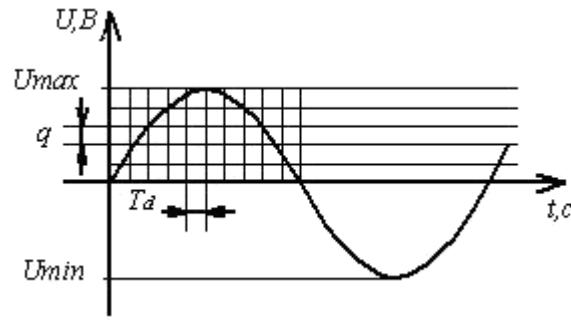


Рис. 4. АЦП змінної напруги та його параметри: q – «вага» молодшого розряду коду (l.s.b. — least significant bit), T_d – період дискретизації в АЦП та ЦАП, U_{min} та U_{max} – відповідно мінімальне та максимальне значення напруги.

Оцифрування змінної напруги передбачає визначення ваги молодшого розряду коду q . Для зменшення апаратної та часової складності (в сенсі теорії складності) використано двійковий код типу знак/модуль числа. Тоді, на молодший біт коду припадає

$$q = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^m} \text{ В}, \quad (12)$$

де m – кількість розрядів регістру пам'яті.

За теоремою Шеннона, частота дискретизації повинна бути не меншою за частоту вдвічі вищу від f_{max} - найбільшої частоти аналогового спектру:

$$T_d \leq \frac{1}{2} T_{f_{max}}. \quad (13)$$

Визначено середньоквадратичну похибку АЦП

$$\varepsilon = \frac{1}{T} \sqrt{\int_T (U(t) - \hat{U}(nT_d))^2 dt}, \quad (14)$$

де $\hat{U}(nT_d) = K \left\{ \int_T U(t) (\delta(nT_d - t) dt) \right\}$, K — оператор квантування, $\delta(nT_d) = \begin{cases} 1, & nT_d = t, \\ 0, & nT_d \neq t; \end{cases}$ — оператор дискретизації. Ця похибка набирає деякого мінімального значення, яке залежить, зокрема, від кількості m розрядів двійкового коду, особливостей аналогового спектру тощо.

Для підвищення функціональних можливостей наближення форми вихідної характеристики МК (петлі гістерезису) використано її поточкове наближення за критерієм (рис. 4)

$$\frac{dU(t)}{dt} \leq \frac{q}{T_d}, \quad (15)$$

де U - значення напруги на виході генератора в момент часу t . Вираз похибки набирає вигляду $\varepsilon \leq q$, де $q = T_d \cdot \left. \frac{dU(t)}{dt} \right|_{\max}$.

Для запису двійкового коду \hat{U} , що пропорційний до значення напруги МК в певний момент часу, в регістр пам'яті для подальшого його узгодження з відповідною робочою точкою на моделі В-Н характеристики використано формулу

$$\hat{U} = \sum \alpha_i 2^i, \quad \alpha_i \in \{0;1\}, \quad (16)$$

де i – порядковий номер регістру пам'яті.

Схематично процес та параметри оцифрування напруги представлені на рис. 5.

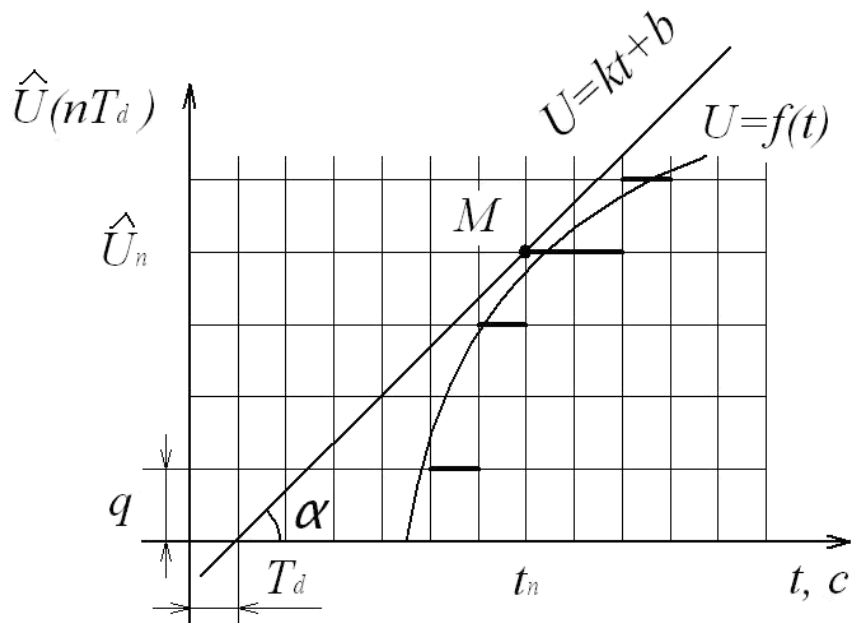
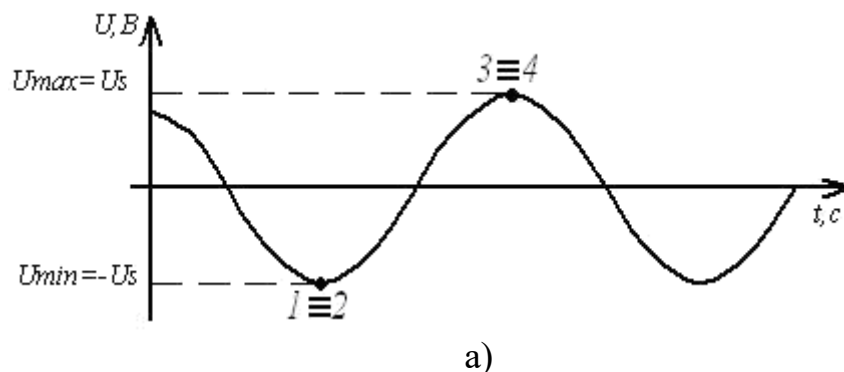
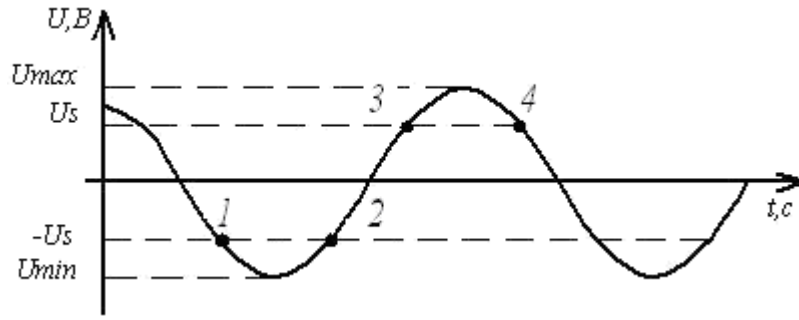


Рис. 5. Параметри оцифрування напруги. α – кут між дотичною до функції $U=f(t)$ в точці M з координатами (t_0, U_0) і додатним напрямом абсциси.

При $\text{tg}\alpha > 0$ функція є зростаючою, і, навпаки, якщо $\text{tg}\alpha < 0$, то функція є спадною. Для інтеграції моделі МК в САПР радіоелектронних кіл встановлено зв'язок між певним значенням напруги \hat{U}_n^{ex} та відповідною робочою точкою на моделі вихідної характеристики МК.



a)



б)

Рис. 6. Значення напруги 1, 2, 3, 4, що є визначальними для стадії перемагнічення осердя МК: а) при максимальній напрузі рівній напрузі насичення $U_{max}=U_s$; б) при максимальній напрузі вищій за напругу насичення $U_{max}>U_s$.

Отримано комп'ютерну модель МК:

$$1-2: \begin{cases} \frac{dU}{dt} = 0, \\ \hat{U}_n^{ex} \leq -\hat{U}_s, \quad H_n = \overline{H_{\min}, H_{\min} + 2H_c}, B_n = B_{\min}, \end{cases} \quad (17)$$

$$2-3: \frac{dU}{dt} > 0, \quad H_n = \overline{H_{\min} + 2H_c, H_{\max}}, B_n = k \sin(2\pi f n T_d + \varphi_2), \quad (18)$$

$$3-4: \begin{cases} \frac{dU}{dt} = 0 \\ \hat{U}_n^{ex} \geq \hat{U}_s, \quad H_n = \overline{H_{\max}, H_{\max} - 2H_c}, B_n = B_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

$$4-1: \frac{dU}{dt} < 0, \quad H_n = \overline{H_{\max} - 2H_c, H_{\min}}, B_n = k \sin(2\pi f n T_d + \varphi_1), \quad (20)$$

де $n = \overline{1, N}$ — індекс цифрових кодів електричних та електромагнітних змінних, решта індексів є цифровими кодами відповідних констант. U_{ex} — вхідна змінна напруга, прикладена до МК. \hat{U}_s — цифровий код значення напруги насичення осердя МК. Аналогічно до виразів (8 – 11) у цій моделі зроблено припущення, що магнітна індукція насичення $B_s = B_{max}$.

У **четвертому розділі** розроблено нові схемотехнічні рішення ДВЕЖ на високочастотних МК, а саме силовий інвертор, кероване джерело живлення з виходом на змінному струмі, в основу роботи яких покладено режим роботи МК по повній петлі гістерезису. Розроблено схемотехнічні рішення стабілізаторів постійної напруги, де використано переключення МК по частковій петлі гістерезису. Останні впроваджено в державному науково-технічному підприємстві «Техас-К».

Наведено результати експериментального запису петлі гістерезису МК. Схема електричного кола дослідного стенду, що використовувався, представлена на рис. 7. Вона складається з генератора ГЗ-109 (XFG₁, опір навантаження $r_{out}=50\text{Ом}, 500\text{Ом}, 600\text{Ом}$ або 5кОм ; тут $f=50\text{кГц}$) синусоїдальної напруги V_g , МК з осердям з аморфного магнітомякого сплаву на основі кобальту, резистора R_1 ; інтегратора R_2C_1 , що дозволило вимірювати сигнали на вищих частотах без додаткових фільтрів

чи алгоритмів обробки сигналів. Для проведення вимірювань використовувався осцилограф ATTEN з частотою дискретизації 100 МГц (XSC1).

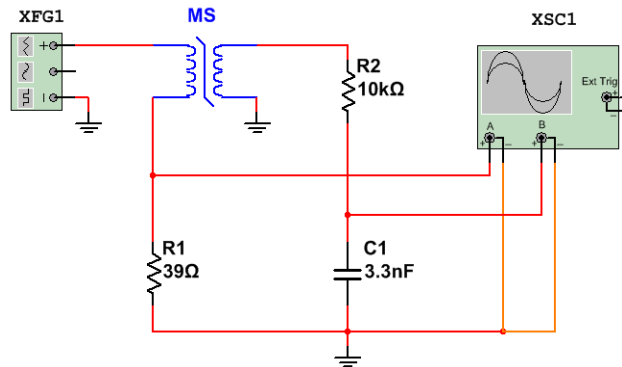


Рис. 7. Схема електричного кола, що використовувалося для вимірювання магнітної індукції B та напруженості магнітного поля H

Напруженість магнітного поля H розраховано наступним чином:

$$H = \frac{U_{chA} \cdot N}{R \cdot l} \quad (21)$$

Оскільки цифровий осцилограф відображає дискретний сигнал, що являє собою послідовність значень напруги в певні моменти часу, розраховано значення магнітної індукції B в кожен момент часу:

$$B = \frac{U_{ch.B} \cdot RC}{SN_2} \quad (22)$$

де S - площа поперечного перерізу осердя МК.

Реалізовано алгоритм моделювання МК в пакеті прикладних програм MATHEWORKS MATLAB 2015R.

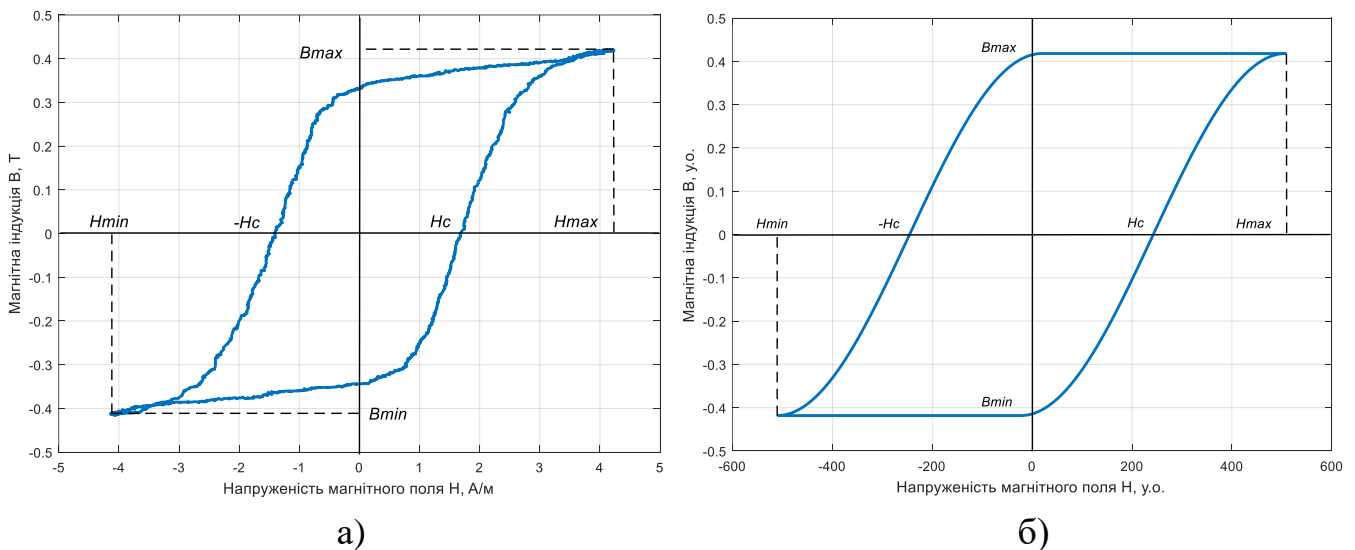


Рис. 8. Вихідна характеристика МК (B - H характеристика матеріалу осердя МК): а) експериментально отримана оцінка математичного сподівання петлі гістерезису на основі 10 вибірок; б) реалізація цифрової моделі петлі гістерезису.

Обчислено середньоквадратичне відхилення σ між експериментальними даними та результатами моделювання.

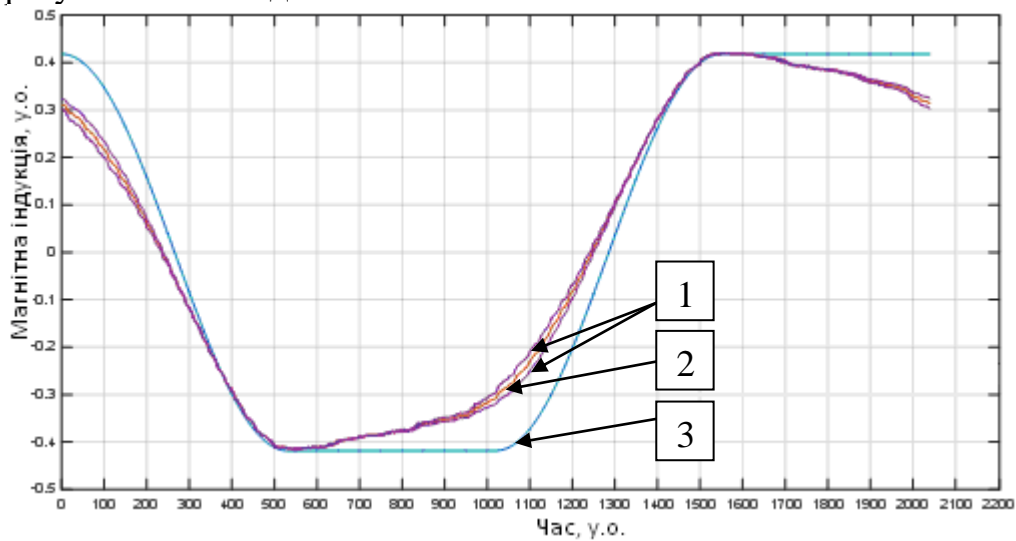


Рис. 9. Порівняння результатів моделювання та експерименту: 1 – середньоквадратичне відхилення σ між експериментальними даними та результатами моделювання, 2 – середнє арифметичне експериментальне значення магнітної індукції, 3 – змодельована форма сигналу магнітної індукції B

У додатках наведено список публікацій Яськів А. В. за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації; інформаційний листок на дослідний зразок типу ОЛ 50*36*35; блок-схему алгоритму числення комп'ютерної моделі високочастотних МК; лістинг програми реалізації алгоритму моделювання високочастотних МК, створений у середовищі MATHWORKS MATLAB 2015R; осцилограми, що демонструють залежність вихідної характеристики високочастотних МК від частоти комутації; акти впровадження дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграції в обчислювальне середовище для автоматизації проектування джерел вторинного електроживлення.

При цьому отримано нижче приведені результати.

1. У результаті проведеного аналітичного огляду існуючих математичних моделей магнітних радіоелектронних компонентів з нелінійними властивостями сформульовано основні вимоги до моделі МК: можливість інтеграції моделі в САПР радіоелектронних кіл, що передбачає в частотній області функцію передачі таку саму, як і в реальному МК, робота в режимі ШІМ; жодним чином не повинні порушуватися режими роботи моделей інших компонентів схеми перетворювача напруги в САПР.
2. Запропоновано та обґрунтовано представлення моделі вихідної характеристики МК фрагментами синусоїдальних функцій локальним 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 МК у 3 рази в порівнянні з відомими моделями, де їх мінімальна кількість становить 6, і в сукупності знизити часову складність реалізації запропонованої моделі.

3. На підставі розробленої математичної моделі вихідної характеристики МК 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 МК.
4. Удосконалено середовище для комп'ютерного моделювання пристроїв на основі МК, в якому, на відміну від існуючого, інтегровано комп'ютерну модель високочастотних МК у бібліотеку компонентів САПР. Обґрунтовано вибір параметрів АЦП напруги, прикладеної до МК, розраховано методичну похибку моделювання. Таким чином забезпечено автоматизацію проектування ДВЕЖ на основі високочастотних МК, а саме багатоканальних перетворювачів напруги та ДВЕЖ з високим рівнем струму навантаження.
5. Достовірність отриманих наукових результатів підтверджено експериментальним опрацюванням сигналів струму та напруги МК та їх порівнянням з результатами моделювання. В процесі досліджень показано повне якісне співпадіння модельованих процесів з реальними при відносній максимальній похибці $\varepsilon \leq 17,2\%$, що перевершує результати, отримані при застосуванні існуючих математичних моделей. Результати проведених досліджень впроваджено під час розробки стабілізатора напруги на високочастотних МК в державному науково-технічному підприємстві «Техас-К», в рамках науково-дослідних робіт та в навчальному процесі ТНТУ, що підтверджено відповідними актами впроваджень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Yaskiv V., Abramovitz A., Smedley K., Yaskiv A. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor. *Special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2015. No. 1A. P. 28-34.
(Індексується у *Scopus, Compendex, Google Scholar*).
2. Yaskiv A., Yavorskyu B. Integration of Magnetic Amplifier Switch Model into Computer Aided Design for Power Converters. *Scientific journal of TNTU*. 2019. No 2 (94). P. 123-133.
(Індексується у *Index Copernicus, Google Scholar*).
3. Яськів А. Математичне моделювання процесів перемагнічення магнітом'яких матеріалів з високою крутизною петлі гістерезису. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2015. №4(53). С. 112-118.
(Індексується у *Index Copernicus, Google Scholar*).

4. Yaskiv V., Yaskiv A. High-Frequency MagAmp Power Inverter. *Computational Problems of Electrical Engineering, Національний університет «Львівська політехніка»*. 2017. Vol. 7, № 2. P.124-130.
(Індексується у *Google Scholar*).
5. Яськів В. І., Яськів А. В. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. *Праці ІЕД НАНУ. Збірник наукових праць*. 2018. № 51. С. 81-85.
(Індексується у *Crossref, OpenUkrainianCitationIndex, Google Scholar*).
6. Yaskiv V., Yaskiv A., Yurchenko O. Synchronous rectification in High-Frequency MagAmp Power Converters. Conference Proceedings of International Conference “Advanced Computer Information Technologies”, ACIT 2018, Ceske Budejovice, Czech Republic, June 1-3, 2018. P.128-131.
(Індексується у *Scopus, Google Scholar*).
7. Yaskiv V., Martseniuk A., Yaskiv A., Yurchenko O., Yavorskyu V. Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter. Conference Proceedings of International Conference “Advanced Computer Information Technologies”, ACIT 2019, Ceske Budejovice, Czech Republic, June 5-7, 2019. P.213-216.
(Індексується у *Scopus, Web of Science, Google Scholar*).
8. Патент України на винахід № 112102, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів А. В., Яськів В. І.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201408531; заявл. 28.07.2014; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14, 2016 р.
9. Патент України на винахід № 112230, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів А. В., Яськів В. І.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201412695; заявл. 26.11.2014; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15, 2016 р.
10. Патент України на винахід № 112231, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів А. В., Яськів В. І.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201413122; заявл. 08.12.2014; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15, 2016 р.
11. Патент України на винахід № 115613, МПК H02M 7/519 (2006.01), МПК H02M 3/337 (2006.01) Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі [Текст] / Яськів В.І., Марценюк А.С., Яськів А.В.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201602381; заявл. 12.03.2016; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22, 2017 р.
12. Патент України на винахід № 116670, МПК H02M 3/335(2006.01) Імпульсний перетворювач постійної напруги / Яськів В. І., Марценюк А. С., Яськів А. В., Мишковець О. П.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № а201602383; заявл.12.03.2016; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8, 2018 р.
13. Патент України на корисну модель № 95618, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів В. І., Яськів А. В.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. –

- № u201408532; заявл. 28.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24, 2014 р.
14. Патент України на корисну модель № 95945, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів А. В., Яськів В. І.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201408533; заявл. 28.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1, 2015 р.
 15. Патент України на корисну модель № 99223, МПК H02M 3/335 (2006.01) Стабілізатор постійної напруги [Текст] / Яськів А. В., Яськів В. І.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201413123; заявл. 08.12.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10, 2015 р.
 16. Патент України на корисну модель № 109557, МПК H02M 3/335 (2006.01) Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі [Текст] / Яськів В.І., Марценюк А.С., Яськів А.В.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201602382; заявл. 12.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16, 2016 р.
 17. Патент України на корисну модель № 110693, МПК H02M 3/335 (2006.01) Імпульсний перетворювач постійної напруги [Текст] / Яськів В.І., Марценюк А.С., Яськів А.В., Мишковець О.П.; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. - № u201602384; заявл. 12.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20, 2016 р.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

18. Yaskiv A. Mathematical modeling at optimization of energy characteristics of electrical power converters. Baku World Forum of Young Scientists 2014. Collection of abstracts. (Baku, May 26-31)Baku, 2014. P.22-23.
19. Яськів А. Математична модель силового ключа на основі високочастотного магнітного підсилювача для його комп'ютерного імітаційного моделювання. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки та приладобудування*» (м. Тернопіль, 20-21 червня 2019 р.). Тернопіль, 2019. С.79-80.
20. Яськів А. Комп'ютерне імітаційне моделювання високочастотного магнітного підсилювача. Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції «*Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування*» (м. Тернопіль, 9-10 червня 2015р.). Тернопіль, 2015. С.67-68.
21. Яськів А. Математичне моделювання високочастотних магнітних підсилювачів. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми, перспективи», (м. Тернопіль, м. Яремче 23-27 лютого 2015 р.). Тернопіль, Яремче, 2015. С.117.
22. Yaskiv V., Abramovitz A., Smedley K., Yaskiv A. Performance Evaluation of MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor. Proceedings of 10th International Conference *ELEKTRO* 2014 (University of Zilina, Rajcke Teplice, Slovak Republic, May 19-20). Rajcke Teplice, 2014.
23. Яськів А., Яськів В. Стабілізатор постійної напруги. Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «*Світлотехніка й електротехніка: історія,*

- проблеми, перспективи»* (м.Тернопіль, м.Яремче, 23-27 лютого 2015 р.). Тернопіль, Яремче, 2015. С.118-119.
24. Яськів В., Яськів А., Марценюк А. Метод побудови високочастотного силового інвертора на основі магнітних підсилювачів. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції *«Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки та приладобудування»* (м.Тернопіль, 8-9 червня 2017 р.). Тернопіль, 2017. С.112-114.
 25. Яськів В., Марценюк А., Яськів А. Модульні перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції *«Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи»* (м. Тернопіль, м. Яремче, 30 січня – 2 лютого 2018 р.) Тернопіль, Яремче, 2018. С.103 – 105.
 26. Яськів В. І., Яськів А. В. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Проблеми сучасної електротехніки-2018, XV Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена 100-річчю Національної академії наук України (м. Київ, 4-8 червня, 2018р.). Київ, 2018. 5 стор.
 27. Яськів А. В. Високоєфективний високочастотний перетворювач напруги підвищуючого типу. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції *«Наука і техніка: виклики сьогодення»* (м. Київ, 08-09 лютого 2013р.). Київ, 2013. С.104-107.
 28. Яськів А. Високочастотний перетворювач напруги по ISIP0 топології. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції *«Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування»* (м.Тернопіль, 5-6 червня 2013р.). Тернопіль, 2013. С.79-82.

АНОТАЦІЯ

Яськів А. В. Математичне моделювання високочастотних магнітних ключів для джерел вторинного електроживлення. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021 р.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальну наукову задачу розробки математичної моделі високочастотних магнітних ключів та її інтеграції в обчислювальне середовище для автоматизації проектування джерел вторинного електроживлення.

Обґрунтовано для моделі вихідної характеристики МК представлення лекальним методом фрагментами синусоїдальних функцій, що суттєво знизило її обчислювальну складність та лягло в основу комп’ютерної моделі високочастотних МК. Запропоновано та обґрунтовано реалізацію моделі МК з допомогою цифрових технологій, а саме – її представлення у вигляді цифрового мікроконтролера.

Обґрунтовано принцип масштабування моделі та вибір параметрів АЦП вхідної та ЦАП вихідної напруг МК, що забезпечило інтеграцію моделі МК у обчислювальні середовища для САПР радіоелектронних кіл. Така інтеграція забезпечує скорочення часу проектування ДВЕЖ за рахунок автоматизації процесу вибору параметрів високочастотних МК.

Ключові слова: високочастотний магнітний ключ, вихідна характеристика, В-Н характеристика, магнітний гістерезис, математична модель, комп'ютерна модель, джерело вторинного електроживлення, система автоматизованого проектування.

АННОТАЦИЯ

Яськів А. В. Математическое моделирование высокочастотных магнитных ключей для источников вторичного электропитания. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021 г.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача разработки математической модели высокочастотных магнитных ключей и её интеграции в вычислительную среду для автоматизации проектирования источников вторичного электропитания.

Обоснованно для модели гистерезиса сердечника МК представление лекальным методом фрагментами синусоидальных функций, что существенно понизило её вычислительную сложность и легло в основу компьютерной модели МК. Предложено и обоснованно реализацию модели МК с помощью цифровых технологий, а именно – в виде цифрового микроконтроллера. Обоснованно принцип масштабирования модели и выбор параметров АЦП входного и ЦАП выходного напряжений МК, что обеспечило интеграцию модели МК в вычислительные среды для САПР радиоэлектронных цепей. Обеспечено автоматизацию проектирования источников вторичного электропитания на основе МК, что снизило временную сложность их разработки.

Ключевые слова: високочастотный магнитный ключ, выходная характеристика, В-Н характеристика, магнитный гистерезис, математическая модель, компьютерная модель, источник вторичного электропитания, система автоматизированного проектирования.

ANNOTATION

Yaskiv A. V. Mathematical modeling of high-frequency magnetic switches for secondary electric power supplies. –Manuscript.

Thesis for Candidate Degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and numerical methods. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

In current thesis a topical scientific task of high-frequency magamp switches mathematical model development and its integration into computer-aided design (CAD)

programmes for magamp power converters design automation is solved. Such power converters are widely used in biomedical, space, lighting engineering, computer and IT technologies, transport systems, cellular network stations, office equipment, etc. Power supplies design automation is provided with computer aided design (CAD) programmes for electric circuits.

In the dissertation the author proposes and reasons a representation of the high-frequency magamp switch model as a component with an output characteristic in a shape of a hysteresis loop. For the first time it is proposed and reasoned to represent the model of magamp switch output characteristic with the decomposition of magamp switch output current and voltage signals into trigonometric Fourier series. It allowed representing the hysteresis of magamp switch output current and voltage with the sum of sinusoids of different frequencies and amplitudes. An approach to modeling magamp switch output characteristic with fragments of sine functions (curve fitting method) was proposed and investigated for a sine function of one given frequency. It significantly decreased model's computational complexity.

A computer model of high-frequency magamp switch output characteristic was developed based on its mathematical model. There was reasoned the use of a digital sine generator, that consists of discreet digital components, as the prototype of its structure, that provided the integration of the mathematical model into CAD computational environments. In contrast to the existing models, whose realization requires a large number of high-quality data, its input parameters, in particular saturation magnetic inductance B_s and coercive force H_c , are defined for every magamp switch core type and are available in datasheets.

Based on the proposed magamp switch output characteristic computer model, a new magamp switch computer model was built. Its realization based on a digital microcontroller, with the further integration into CAD programme computational environment, was suggested and reasoned. Since magamp power converters are analogue devices, and the developed magamp switch computer model is realized with digital technologies, there was a need for magamp switch input voltage analogue-to-digital conversion (ADC), and its output voltage digital-to-analogue conversion (DAC). The principle of model's scaling, and the choice of input voltage ADC and output voltage DAC parameters was reasoned. It allowed magamp switch model integration into computational environments for CAD programmes for electric circuits. Design automation of power converters based on magamp switches was provided, hence the time required for their design was decreased.

The environment for computer modeling of devices based on magamp switches was further developed, compared to its former version, gaining an integrated realization of the magamp switch computer model.

An experimental magamp switch $B-H$ characteristic was obtained to verify the developed magamp switch model. For this purpose, an experimental electric circuit with high-frequency magamp switch was built and investigated. Absolute error ε and mean-square deviation σ between modeled data and experimental results were calculated.

Automation of magamp power converters design enhances development of new topologies. Within the framework of this research there were developed a power inverter,

controlled power supply with ac output, and pulse dc voltage stabilizer, where the magamp switch operates along full hysteresis loop. There was developed dc voltage stabilizer, where magamp switch operates along partial hysteresis loop. This topology was implemented in State Scientific Technical Enterprise TEKHAS-K.

The representation of high-frequency magamp switch output characteristic's mathematical model with fragments of sine functions (curve fitting method), and its computer realization with digital technologies provided the integration of magamp switch computer model into the computational environment of CAD programmes for electric circuits. This provided the automation of magamp power converters design that decreased its time, computational complexity, allowed the choice of magamp switch parameters without its necessary manual testing, enhanced development of new power converters topologies and series production of multichannel power supplies and power converters with high load current, and it is a topical and important practically useful result of the dissertation research.

Key words: high-frequency magamp switch, output characteristic, B-H characteristic, magnetic hysteresis, mathematical model, computer model, secondary power supply, computer-aided design programme.



Підписано до друку 02.03.2021. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman
Умовно-друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Замовлення № 02032021

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф. 38.
тел. (0352) 528-777.