

Ніжин, ТОВ «Аспект-Поліграф», 2011. – 512 с.

6. Соколов Э.М. Автоматизированная система экологического мониторинга атмосферы при выбросах вредных веществ / Э.М. Соколов, В.М. Панарин, А.А. Зуйкова, А.В. Бизикин // Информационные технологии. - 2008. - № 4. - С. 58-61.

#### References

1. Babak V.P., Kanchenko V.A., Kluchnikov A.A., Krasnov V.A., Chepur N.L. Bepilotnye aviazionnyekompleksy kak sredstvo radiazionnogo monitoring AES i okrugayutchej sredy// Problemy bespeky atomnykh elektrostanzij i Tchornobylja. - 2012. - Vyp.19.- S. 60-69.

2. Babak V.P., Myslovich M.V., Sysak R.M. Statisticheskaja diagnostika elektrotechnicheskogo oborudovaniya: Monografija. – K.: In-t elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2015. – 456 s.

3. Vartanov A.S., Ruban A.D., Schkuratnik V.L. Metody i pribory kontrolja okrugajuchej sredy i ekologicheskij monitoring. – M.: Isd-vo MGGU: Gornajakniga, 2009. – 641 s.

4. Claudi, A. Practicl experiences and performance of monitoring systems / A. Claudi, S. Berlijn, P. Mohaupt // Cigre Session 2008, report D1-107.

5. Burachek V.G., Gelesnjak O.O., Sazerkovnyj V.I. Osnovygeoinformazionnychsystem. - Nigyn, TOV «Aspekt-Poligraf», 2011. – 512 s.

6. Sokolov E.M., Panarin V.M., Sujkova A.A., Bisikin A.V. Avtomatisirovannaja sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfery pri vybrosach vrednykh vetchestv// Informazionnye tehnologii. - 2008. - № 4. -S. 58-61.

Рецензія/Peer review : 23.11.2015 р.

Надрукована/Printed :15.12.2015 р.

Рецензент: д-р техн. наук, проф.Ю.В. Куц

**УДК 621.3.07**

**А.В. ЯСЬКІВ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМАГНІЧЕННЯ МАГНІТОМ'ЯКИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИСОКОЮ КРУТИЗНОЮ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ**

*В роботі приведено результати математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання осердя магнітного ключа з матеріалу 84КХСР, використовуючи математичні моделі магнітного гістерезису Джілса-Атертона та Джона Чана. Досліджено, що в зв'язку з обмеженнями цих моделей не можливо з достатньою точністю змоделювати процеси перемагнічення осердя. Виявлено потребу в розробці нової математичної моделі, що дозволяла б моделювати роботу магнітного ключа безпосередньо в середовищі САD- програми.*

*Ключові слова: математична модель, високочастотний магнітний підсилювач, САD-програма, модель магнітного гістерезису Джілса-Атертона, модель магнітного гістерезису Джона Чана*

**A.V. YASKIV**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## **MATHEMATICAL MODELING OF REMAGNETIZATION PROCESSES OF SOFT MAGNETIC MATERIALS WITH HIGH STEEPNESS OF HYSTERESIS LOOP**

*Abstract – The aim of the research is to explore the possibility of using existing software means for modeling power supplies based on magnetic switches in a single CAD-programme.*

*Cobalt-based soft magnetic core was modeled using Jiles-Atherton and John Chan magnetic hysteresis models in PSpice and LTspice IV respectfully. Models' limitations proved to be significant, and they cannot be used to model the remagnetization processes of magnetic switch accurately. Thus there is a need for a new mathematical model which would allow magnetic switch computer simulation in CAD-programme.*

*An equivalent circuit approach is suggested as a possible way for creation of such model.*

*Keywords: mathematical model, high frequency magnetic amplifier, CAD-programme, Jiles-Atherton model of magnetic hysteresis, John Chan model of magnetic hysteresis*

### **Вступ**

Забезпечення електроживлення радіоелектронної апаратури (РЕА) ґрунтується на принципах перетворення та регулювання параметрів електричної енергії. Зазвичай, у джерелах вторинного електроживлення (ДВЕЖ) комутаційну та регулюючу функції виконують напівпровідникові елементи. Однак, у випадках, коли необхідно реалізувати багатоканальні джерела електроживлення, забезпечити високий рівень експлуатаційних характеристик, низький рівень електромагнітних завад, як регулюючі елементи використовують високочастотні магнітні підсилювачі (ВМП) на основі сучасних магнітом'яких матеріалів з високою крутизною петлі гістерезису(коефіцієнт прямокутності  $k_p > 0.99$ ) – магнітні ключі (МК) [1,2].

Важливим етапом при розробці ДВЕЖ є комп'ютерне імітаційне моделювання. Воно здійснюється

у середовищі CAD-програми (Computer-Aided Design Programme), наприклад, PSpice, Powersim, Multisim, LabView тощо та забезпечує зменшення складності, тривалості і, як результат, зниження вартості проектування. Складність моделювання МК полягає в необхідності врахування його динамічних характеристик та магнітного гістерезису при перемагніченні осердя дроселя насичення (ДН). Криві намагнічення, або петлі гістерезису магнітних матеріалів, змінюються як функція частоти та форми сигналу прикладеного магнітного поля [3,4]. Однак, на сьогоднішній день CAD-програми не працюють з розрахунком магнітних полів і дозволяють здійснювати моделювання тільки дискретних електричних компонентів. У бібліотеках CAD-програм відсутній компонент, що враховував би нелінійні властивості ВМП і дозволяв моделювати ВМП в режимі роботи силового ключа. Математичні моделі магнітного гістерезису Прайзаха [5-8], Джікса-Атертона [9-12], Джона Чана [13] є статичними та не підходять для моделювання динамічних явищ. Для комп'ютерного імітаційного моделювання магнітних компонентів, зокрема осердь трансформаторів та котушок індуктивності, використовують розширені моделі гістерезису Прайзаха та Джікса-Атертона [14-18], що враховують залежність гістерезису від частоти, та моделі з використанням штучних нейронних мереж [19, 20]. Однак, у зв'язку з емпіричною природою цих моделей, необхідна велика кількість високоточних експериментальних даних для забезпечення їх адекватності. Також постає проблема їх інтеграції у середовище CAD-програми й узгодження з роботою її інших компонентів. Тому актуальною є задача розробки моделі магнітного ключа для його комп'ютерного імітаційного моделювання безпосередньо в середовищі CAD- програми. Її вирішення дозволило б автоматизувати процес проектування ДВЕЖ на основі МК, сприяло б оптимізації їх параметрів та виникненню нових схемотехнічних рішень.

### 1. Принцип роботи магнітного ключа

Магнітний ключ є дроселем насичення, що складається з осердя магнітного матеріалу з відносно прямокутною В-Н характеристикою (рис. 1.а) та обмотки навколо нього [21]. Це активний компонент, що окрім комутаційної функції разом із схемою керування здійснює широтно-імпульсну модуляцію для регулювання параметрів електричної енергії в замкнутих системах електроживлення. Організація ШІМ стала можливою завдяки фундаментальній властивості матеріалу осердя МК запам'ятовувати магнітний стан при знятті зовнішніх збуджень. Робочий цикл МК складається з двох півперіодів: півперіоду керування та робочого. У півперіод керування відбувається розмагнічення магнітопроводу ДН МК від рівня індукції насичення  $B_s$  до якогось рівня індукції  $B_1$  (ділянка 1-2, рис. 1.а) у функції сигналу керування. В робочій точці 2 осердя ДН знаходиться в ненасиченому стані. Тут, у зв'язку з високою магнітною проникністю осердя, індуктивність ДН буде настільки високою, що перешкоджатиме протіканню електричного струму. На ділянці 2-3 МК знаходиться у непровідному стані. При зміні полярності вхідної напруги (робочий півперіод) перемагнічування керованого дроселя насичення почнеться із запам'ятованого рівня індукції  $B_1$ . Магнітний потік в осерді ДН зростає, доки не досягне рівня насичення (ділянка 2-3, рис. 1.а)). В насиченому стані робоча точка зміщується в 4. Тут магнітна проникність осердя ДН дуже низька, величина індуктивності настільки мала, що нею можна знехтувати, що дозволяє протікання високого струму в колі [21]. На ділянці 4-1 МК знаходиться в провідному стані. Ширина петлі гістерезису (довжина ділянки 2-3) пропорційна втратам потужності при перемагніченні ДН.

На рисунку 1.б) представлено форми сигналів вхідної високочастотної напруги  $U_2$  (як правило, напруга вторинної обмотки трансформатора), напруги  $U_{TS}$  на магнітному ключі, сили струму  $i_n$  у навантаженні. Протягом часу  $T_{off}$  МК знаходиться в непровідному стані, протягом часу  $T_{on}$  МК проводить електричний струм.

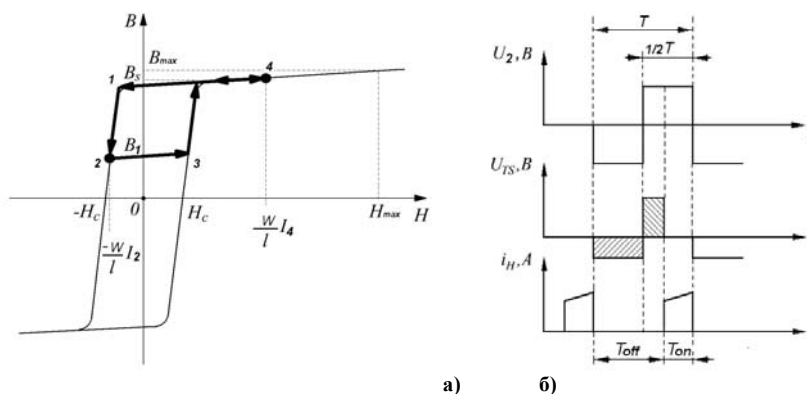


Рис. 1. а) В-Н характеристика (петля гістерезису) матеріалу осердя магнітного ключа; б) форми сигналів напруги  $U_2$  на вторинній обмотці трансформатора, напруги  $U_{TS}$  на магнітному ключі, сили струму  $i_n$  у навантаженні

Якщо осердя перемагнічується неповністю, то перемагнічування відбувається по неповній, частковій петлі гістерезису. Якщо намагнічуючий та розмагнічуючий імпульси відрізняються за величиною чи формою, то зміни В(Н) по висхідній та низхідній гілках петлі гістерезису будуть неоднаковими, петля буде несиметричною [3]. Перемагнічення МК відбувається по часткових асиметричних петлях гістерезису.

Динамічна петля гістерезису ширша від статичної. Перемагнічування осердя МК гальмують

магнітна в'язкість та вихрові струми. Магнітна в'язкість – запізнення в орієнтації доменів за напруженістю  $H$ . Вихрові струми самі створюють магнітне поле, яке, за законом магнітної індукції, зустрічне зовнішньому магнітному полю, і цим екранують внутрішні шари стрічки магнітопроводу від впливу зовнішнього поля. Вони тим менші, чим тоншою є товщина стрічки (пластини) магнітопроводу [3].

## 2. Математичне та комп'ютерне імітаційне моделювання магнітних матеріалів

Для комп'ютерного імітаційного моделювання магнітних компонентів, зокрема осередь котушок індуктивності та трансформаторів, безпосередньо в САД-програмах використовують математичні моделі магнітного гістерезису Джіlsa-Атертона та Джона Чана. Також розвивається аналогове моделювання явищ магнетизму еквівалентними схемами заміщення в дискретних електричних компонентах, зокрема RC ланками [22, 23].

Математична модель магнітного гістерезису Джіlsa-Атертона ґрунтується на врахуванні оборотного (безгістерезисного) та необоротного зміщення доменних меж [9]. При дії магнітного поля на матеріал моменти окремих доменів починають повертатися, орієнтуючись вздовж силових ліній магнітного поля. При слабких полях цей поворот супроводжується пружним прогином доменної стінки, при сильних – зміщенням границь доменів (ефект сухого тертя). Прогин стінки є оборотним процесом, тобто при знятті зовнішнього магнітного поля домен повертається у вихідний стан, не змінюючи границь. При «сухому терті» після зняття зовнішнього магнітного поля залишається внутрішня намагніченість [11]. Згідно з моделлю, загальна намагніченість  $M$  є сумою оборотної ( $M_{rev}$ ) та необоротної ( $M_{irr}$ ) її складових. Модель Джіlsa-Атертона можна представити у вигляді нелінійного диференціального рівняння [9]

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{(1+c)} \cdot \frac{(M_{an} - M)}{\frac{k\delta}{\mu_0} - \alpha_w(M_{an} - M)} + \frac{c}{(1+c)} \cdot \frac{dM_{an}}{dH} \quad (1)$$

де  $M$  – намагніченість,  
 $H$  – напруженість магнітного поля,  
 $\alpha_w$  – постійна Вейса.  
 $M_{an}$  – безгістерезисна намагніченість,  
 $k$  – характеризує затримку зміщення доменних меж,  
 $c$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню початкової магнітної проникності  $\mu_i$  до безгістерезисної магнітної проникності  $\mu_{an}$  при  $H=0$ :

$$c = \frac{\mu_i}{\mu_{an}} \quad (2)$$

Величина  $\delta$  набуває значення +1 при  $\frac{dM}{dH} > 0, M_{an} > M$  (ділянка I петлі гістерезису, рис. 2) та -1 при

$\frac{dM}{dH} > 0, M_{an} < M$  (ділянка III). При  $\frac{dM}{dH} = 0, M = const, \delta=0$  (ділянки II та IV) [11].

Числові значення  $\alpha_w, c, k$  визначаються експериментально для кожного магнітного матеріалу.

Безгістерезисну криву намагнічення можна визначити експериментальним шляхом, однак це дуже складно з технічної точки зору [17]. Щоб виміряти безгістерезисну намагніченість при заданому постійному магнітному полі  $H$  зразок магнітм'якого матеріалу слід намагнітити з розмагніченого стану до величини  $H$ , після чого провести розмагнічення під впливом змінного магнітного поля, орієнтованого полем  $H$ . Проблематичним є забезпечення точності чисельного інтегрування при вимірюванні густини магнітного потоку флюксметром під час розмагнічення матеріалу. Тому експериментально верифікувати модель без гістерезисного намагнічення можливо тільки для магнітних матеріалів з високим коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезису (коли явищем гістерезису можна знехтувати)[24].

Проведено моделювання осереддя для магнітного ключа з магнітм'якого аморфного сплаву 84КХСР, коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису  $k_n=0,991$ . Як вихідні дані використано результати вимірювань (рис. 3.а), 4 а)), надані у Сертифікаті № 781 від 01.04.2005 на дослідний зразок типу ОЛ 50\*36\*35 заводу ООО «Завод Эллипс» [25].

Експериментально виміряні значення напруженості магнітного поля  $H$  та магнітної індукції  $B$ , що використовувались при моделюванні петлі гістерезису осереддя з матеріалу 84 КХСР, наведено в таблиці 1. У діалоговому вікні *PSpice Model Editor/Hysteresis Curve* одиниця вимірювання напруженості магнітного поля – Ерстед, а магнітної індукції – Гаус. Узгодження з одиницями вимірювання системи СІ здійснюється за наступними співвідношеннями:  $1 \text{ Тл} = 10000 \text{ Гс}, 1 \text{ Е} = \frac{1000}{4\pi} \frac{\text{А}}{\text{м}}$ .

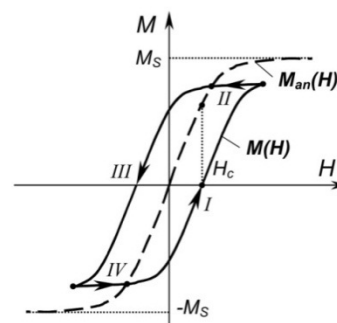


Рис. 2. Петля магнітного гістерезису за моделлю Джіlsa-Атертона [11]

Таблиця 1

Експериментальні значення напруженості магнітного поля  $H$  та магнітної індукції  $B$ 

$H, A/m$	$H, E$	$B, Tл$
0	0	0,5560
0	0	-0,5560
15,97	0,200685	0
-15,97	-0,200685	0
20,2	0,253840	0,5569
12,0	0.150796	-0,55190
-12,0	-0.150796	0,55190

Перелік параметрів моделі Джілса-Атертона у середовищі PSpice наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

## Параметри моделі Джілса-Атертона у середовищі PSpice

Параметр	Смислове значення	Розмірність	Значення за замовчуванням	Розраховані значення
LEVEL	Рівень моделі	-	2	
GAP	Ширина повітряного зазору	см	0	0
MS	Намагніченість насичення $M_s$	A/m	1000000	480000
A	Параметр теплової енергії, характеризує форму безгістерезисної кривої намагнічення	A/m	1000	9.903
C	Параметр пружного зміщення доменних меж	-	0.2	0.1936
K	Параметр анізотропії доменів, характеризує затримку зміщення доменних меж	A/m	500	25
AREA	Середня площа поперечного перерізу осердя	см <sup>2</sup>	0.1	1.9317
PATH	Середня довжина магнітної силової лінії	см	1	13.446
PACK	Коефіцієнт заповнення осердя	-	1	1

Середовище PSpice/ PSpice Model Editor дозволяє автоматично визначати параметри  $M_s$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $K$  моделі за експериментально вимірними значеннями напруженості магнітного поля  $H$  та відповідними їм значеннями магнітної індукції  $B$  і початковою магнітною проникністю  $\mu_i$ . Однак, за наявності тільки семи експериментальних точок результат моделювання статичної петлі гістерезису був незадовільним. Тому було проведено розрахунок параметрів моделі аналогічно до наведеного у [10]. Оскільки відносна похибка моделювання все ще становила 18%, то було збільшено  $K$  до 25 A/m, чим досягнуто більшої відповідності моделі експериментальним точкам та зменшено відносну похибку до 2%. Кінцевий результат моделювання петлі гістерезису осердя з матеріалу 84 КХСР представлено на рис. 3 б).

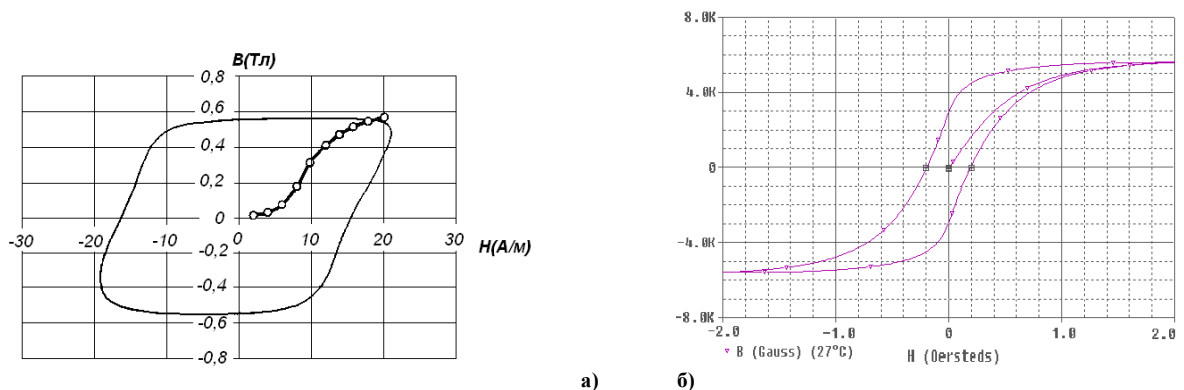


Рис. 3. Петля гістерезису осердя ДН з матеріалу 84 КХСР: а) отримана експериментально [25]; б) отримана за моделлю Джілса – Атертона в середовищі PSpice

З допомогою команди PSpice Model Editor/File/Create Capture Parts на основі змодельованої В-Н характеристики створюється компонент для комп'ютерного імітаційного моделювання осердя як складової ДН.

Математична модель гістерезису Джілса-Атертона характеризується значною обчислювальною складністю. Її параметри можна розрахувати тільки наближено, а отримати вихідні дані для розрахунку складно з технічної точки зору. В зв'язку з цим розрахунок параметрів моделі є наближеним, що призводить

до похибки моделювання. Модель є статичною і не враховує залежність втрат потужності на перемагнічення від частоти комутації.

Модель Джона Чана є значно простішою у реалізації в порівнянні з моделлю Джілса-Атертона. Вона описується меншою кількістю параметрів, при чому всі вони є довідниковими. Основна петля магнітного гістерезису складається з двох кривих: нижня крива відповідає зростаючій напруженості магнітного поля  $H$ , верхня – спадній напруженості магнітного поля.

Верхня крива задається рівнянням [13]

$$B'_+(H) = B_S \frac{(H + H_c)}{|H + H_c| + \left(\frac{B_S}{B_r} - 1\right)} \quad (3)$$

де  $B_S$  - магнітна індукція насичення,  
 $B_r$  - залишкова магнітна індукція,  
 $H_c$  - коерцитивна сила.

Нижня крива задається рівнянням [13]

$$B'_-(H) = B_S \frac{(H - H_c)}{|H - H_c| + \left(\frac{B_S}{B_r} - 1\right)} \quad (4)$$

У даній моделі крива намагнічення задається середнім значенням верхньої та нижньої кривих основної петлі магнітного гістерезису [13]:

$$B'_{mag}(H) = \frac{B'_+(H) + B'_-(H)}{2} \quad (5)$$

Для моделі характерна інверсна симетрія [13]

$$B'_+(H) = -B'_-(H) \quad (6)$$

Перелік параметрів моделі Джона Чана у середовищі LTspice IV наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

**Параметри моделі Джона Чана у середовищі LTspice IV**

Параметр	Смислове значення	Одиниці вимірювання	Значення параметрів для модельованого осердя
$H_c$	Коерцитивна сила	А*виток/м	15,97
$B_r$	Залишкова магнітна індукція	Тл	0,5519
$B_S$	Магнітна індукція насичення	Тл	0,5569
$Lm$	Довжина магнітної лінії (не включаючи ширину повітряного зазору)	м	0,13446
$Lg$	Ширина повітряного зазору	м	0
$A$	Площа поперечного перерізу осердя	м <sup>2</sup>	$1,9317 \cdot 10^{-4}$
$N$	Кількість витків	-	1

Змодельовані форми сигналів сили струму та напруги на ДН в стані насичення приведено на рис. 4 б). Для стану насичення відносна похибка при моделюванні сигналу напруги становить 5%, струму – 7,3%.

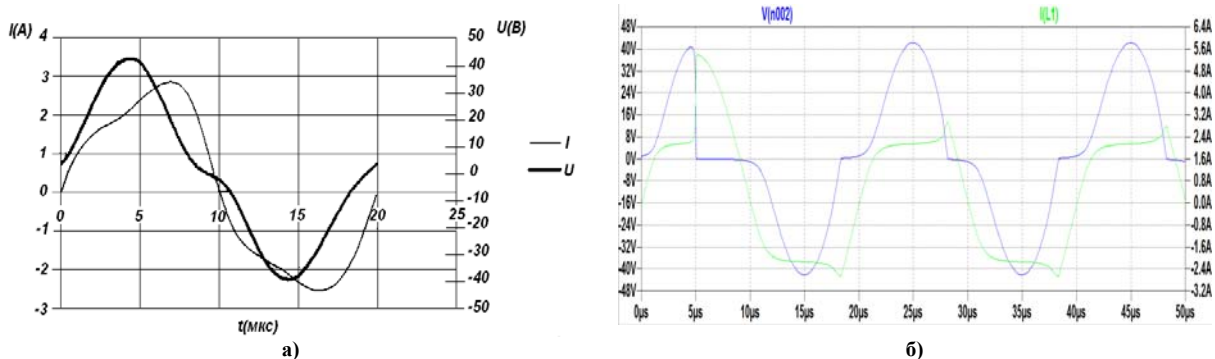


Рис. 4. Форми сигналів струму та напруги на ДН: а) отримані експериментально; б) отримані, використовуючи модель Джона Чана в середовищі LTspice IV

Як і модель Джілса-Атертона математична модель магнітного гістерезису Джона Чана не враховує частотні властивості матеріалу осердя. Вона дозволяє моделювання процесів перемагнічення тільки по симетричних петлях гістерезису. Оскільки намагнічуючі та розмагнічуючі імпульси МК часто є різними за тривалістю (а, отже петля гістерезису є частковою і асиметричною), модель не може застосовуватися для

його моделювання.

Оскільки інтегровані в CAD-програми математичні моделі магнітного гістерезису не дозволяють адекватно змоделювати процеси перемагнічення МК, доцільно дослідити можливість розробки його аналогової моделі на дискретних електричних компонентах. Важливо, щоб модель враховувала частотну залежність втрат потужності при перемагніченні осердя МК від частоти комутації, та щоб параметри цієї моделі були довідниковими.

### Висновки

У статті висвітлено проблему математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання процесів перемагнічення магнітом'яких матеріалів з високим коефіцієнтом прямокутності петлі гістерезису. Математичні моделі магнітного гістерезису, що використовуються для комп'ютерного імітаційного моделювання мають ряд суттєвих недоліків, що не дозволяють їх використовувати для моделювання магнітних ключів. У статті приведено результати математичного моделювання процесів перемагнічення осердя для магнітного ключа з магнітом'якого матеріалу 84КХСР. Реалізовано та досліджено моделі Джілса-Атертона та Джона Чана у середовищах PSpice та LTSpice IV відповідно. Виявлено необхідність розробки математичної моделі процесів перемагнічення магнітного ключа для його комп'ютерного імітаційного моделювання безпосередньо в середовищі CAD-програми.

### Література

1. Magnetics inc. Technical Bulletin. Mag Amp Cores and Materials.
2. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG., Tape Wound Cores for Magnetic Amplifier Chokes, Nanocrystalline VITRO-PERM 500 Z, preliminary product leaflet, 2001.
3. Л. В. Шопен. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрические аппараты». - М., «Энергия», 1976р. – 568с.
4. M. Fecioru-Morariu, A. Paduraru, and O. Caltun, “The Influence of the Frequency and Waveform on the Hysteresis Loop of some NiZnCu Ferrites,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 5, No. 4, December 2003, pp. 985-990.
5. F. Preisach, “Über die magnetische Nachwirkung,” Zeitschrift für Physik, vol. 94, 1935, pp. 861-890.
6. Mayergoyz, Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications, second edition, Elsevier Science Inc., 2003. – 498 p.
7. R. C. Smith, “Smart Material Systems: Model Development,” Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2005. – 501p.
8. Modelling, Programming and Simulations Using LabVIEW Software. Edited by Riccardo de Asmundis. Intech, Croatia, 2011. – 306p.
9. D.C. Jiles and D. L. Atherton, “Theory of Ferromagnetic Hysteresis,” J. Magn. And Magn. Mater., vol. 61, 1986, pp. 48-60.
10. Строев Н. Н. Исследование предельных возможностей использования новых магнитных материалов в высокочастотных источниках вторичного электропитания: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.09.12/ Строев Николай Николаевич.- М., 2000г.-230с.
- 10.1. А. Новиков, М. А. Амелина. Конспект лекций по курсу «Математическое моделирование в электронике». - Смоленск, 2006. – 74с.
11. L. Dupre and J. Melkebeek, “Electromagnetic hysteresis modelling: from material science to finite element analysis of devices,” International Society Compumag Newsletter, vol. 10, issue 3, 2003. – pp.4-15.
12. J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebman, and J. Valainis, “Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation,” IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 10, No 4, April 1991. – pp. 476 – 482.
13. D.C. Jiles, “Frequency dependence of hysteresis curves in ‘non-conducting’ magnetic materials,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 12, 1993, pp. 3490-3492.
14. D.C. Jiles, “Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials,” Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 10, 1994, pp.5849-5855.
15. P. R. Wilson, J. N. Ross, and A. D. Brown, “Modeling Frequency-Dependent Losses in Ferrite Cores,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 3, May 2004, pp. 1537-1541.
16. R. Szewczyk and P. Frydrych, “Extension of the Jiles – Atherton Model for Modelling the Frequency Dependence of Magnetic Characteristics of Amorphous Alloy Cores for Inductive Components of Electronic Devices,” ACTA Physica Polonica A, Vol. 118, No. 5, 2010, pp. 782-784.
17. O. Özoğönel, K. R. I. Gëuney, È. Usta, and H. Dirik, “A novel three-phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink,” Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.20, No.4, 2012, pp. 479-492.
18. X.-H. Yuan and Q.-Y. Feng, “Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers with Memory Effects Using Orthonormal Hermite Polynomial Basis Neural Network,” Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 2013. – pp.239-251.
19. J. Konieczny, L.A. Dobrzański, B. Tomiczek, and J. Trzaska, “Application of the artificial neural networks for prediction of magnetic saturation of metallic amorphous alloys,” Archives of Materials Science and Engineering, vol. 30, issue 2, April 2008. – pp. 105-108.

20. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, "MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor," special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015,p. 28-34.
21. H.-G. Piao, D.-H. Kim, J.-H. Shim, and L.Q. Pan, "RC-circuit-like dynamic characteristic of the magnetic domain wall in ferromagnetic nanowires," Chinese Physics Letters, 02.2015, vol. 32(8).
22. D. M. G. Leite, A. Batagin-Neto, O. Nunes-Neto, J. A. Gymez, and C. F. O. Graeff, "Electrically detected magnetic resonance modeling and fitting: An equivalent circuit approach," Journal of Applied Physics Vol. 115, 034510 (2014); doi: 10.1063/1.4862178.
23. R. Szewczyk, "Validation of the An hysteretic Magnetization Model for Soft Magnetic Materials with Perpendicular Anisotropy," Materials, Vol. 7, p.5109-5116, 2014; doi:10.3390/ma7075109.
24. Сертифікат № 781 от 01.04.2005 на образец ОЛ 50\*36\*35, завод ООО «Завод Эллипс».

#### References

1. Magnetics inc. Technical Bulletin. Mag Amp Cores and Materials.
2. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG., Tape Wound Cores for Magnetic Amplifier Chokes, Nanocrystalline VITRO-PERM 500 Z, preliminary product leaflet (2001)
3. L. V. Shopen, "Beskontaktnye elektricheskie apparaty avtomatiki. Uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushhihsya po specialnosti "Elektricheskie apparaty", M. "Energiya," 1967. – 568p.
4. M. Fecioru-Morariu, A. Paduraru, and O. Caltun, "The Influence of the Frequency and Waveform on the Hysteresis Loop of some NiZnCu Ferrites," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 5, No. 4, December 2003, pp. 985-990.
5. F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung," Zeitschrift für Physik, vol. 94, 1935, pp. 861-890.
6. Mayergoz, "Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications, second edition," Elsevier Science Inc., 2003. – 498 p.
7. R. C. Smith, "Smart Material Systems: Model Development," Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2005. – 501p.
8. Modelling, Programming and Simulations Using LabVIEW Software. Edited by Riccardo de Asmundis. Intech, Croatia, 2011. – 306p.
9. D.C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of Ferromagnetic Hysteresis," J. Magn. And Magn. Mater., vol. 61, 1986, pp. 48-60.
10. N. Stroyev, "Issledovanie predelnih vozmozhnostej ispolzovaniya novih magnitnih materialov v visokochastotnih istochnikah vtorichnogo elektropitaniya: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk: 05.09.12/ Stroyev Nikolaj Nikolayevich," M., 2000, 230s.
11. A. Novikov, M. A. Amelina, "Konspekt lekciy po kursu "Matematicheskoe modelirovanie v elektronike," Smolensk, 2006. – 74s.
12. L. Dupre and J. Melkebeek, "Electromagnetic hysteresis modelling: from material science to finite element analysis of devices," International Society Compumag Newsletter, vol. 10, issue 3, 2003. – pp.4-15.
13. J. H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebman, and J. Valainis, "Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation," IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 10, No 4, April 1991. – pp. 476 – 482.
14. D.C. Jiles, "Frequency dependence of hysteresis curves in 'non-conducting' magnetic materials," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 12, 1993, pp. 3490-3492.
15. D.C. Jiles, "Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials," Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 10, 1994, pp.5849-5855.
- 15.1. R. Wilson, J. N. Ross, and A. D. Brown, "Modeling Frequency-Dependent Losses in Ferrite Cores," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 3, May 2004, pp. 1537-1541.
16. R. Szewczyk and P. Frydrych, "Extension of the Jiles – Atherton Model for Modelling the Frequency Dependence of Magnetic Characteristics of Amorphous Alloy Cores for Inductive Components of Electronic Devices," ACTA Physica Polonica A, Vol. 118, No. 5, 2010, pp. 782-784.
17. Ėozgoĕnenel, K. R. I. Gĕuney, Ė. Usta, and H. Dirik, "A novel three-phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink," Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.20, No.4, 2012, pp. 479-492.
18. X.-H. Yuan and Q.-Y. Feng, "Behavioral Modeling of RF Power Amplifiers with Memory Effects Using Orthonormal Hermite Polynomial Basis Neural Network," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 2013. – pp.239-251.
19. J. Konieczny, L.A. Dobrzański, B. Tomiczek, and J. Trzaska, "Application of the artificial neural networks for prediction of magnetic saturation of metallic amorphous alloys," Archives of Materials Science and Engineering, vol. 30, issue 2, April 2008. – pp. 105-108.
20. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, "MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor," special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015,p. 28-34.
21. H.-G. Piao, D.-H. Kim, J.-H. Shim, and L.Q. Pan, "RC-circuit-like dynamic characteristic of the magnetic domain wall in ferromagnetic nanowires," Chinese Physics Letters, 02.2015, vol. 32(8).
22. D. M. G. Leite, A. Batagin-Neto, O. Nunes-Neto, J. A. Gymez, and C. F. O. Graeff, "Electrically detected magnetic resonance modeling and fitting: An equivalent circuit approach," Journal of Applied Physics Vol. 115, 034510 (2014); doi: 10.1063/1.4862178.
23. Szewczyk, "Validation of the An hysteretic Magnetization Model for Soft Magnetic Materials with Perpendicular Anisotropy," Materials, Vol. 7, p.5109-5116, 2014; doi:10.3390/ma7075109.
24. Сертифікат # 781 от 01.04.2005 на образец ОЛ 50\*36\*35, завод ООО «Завод Эллипс».

Рецензія/Peer review :9.12.2015 р. Надрукована/Printed :19.12.2015 р.  
Рецензент: д. т. н., професор Євтух П. С.