

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНИ КЛЮЧОВЕ С АМОРФНИ И НАНОКРИСТАЛНИ МАТЕРИАЛИ

Михаела Славкова, Костадин Миланов и Минчо Минчев

Резюме: В статията се предлага едно ново приложение на аморфни и нанокристални магнитно меки материали с линеен хистерезисен цикъл тип „F” при несиметрични режими в магнитни ключове използвани в системи за компресиране на магнитни импулси (Magnetic Pulse Compression Systems – MPCS). Първоначалното състояние на магнитопроводите с линейни характеристики при несиметрични режими се възстановява по естествен път и не е необходимо използването на размагнитваща намотка. Представени са основните изисквания към материалите използвани в магнитни ключове и е аргументиран избора на материали с линейни магнитни характеристики при несиметрични режими. Направена е съпоставка между изчислителните мощности на магнитни ключове с магнитни материали с правоъгълен хистерезисен цикъл тип „Z” и при използване на материали с линеен тип „F” хистерезисен цикъл.

Ключови думи: аморфни магнитно меки материали, аморфни и нанокристални материали, линейни магнитни характеристики, магнитни ключове, нанокристални магнитно меки материали, компресиране на магнитна импулси

STUDY OF MAGNETIC SWITCHES WITH AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE MATERIALS

Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev

Abstract: The presented paper proposes a new application of amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials with linear hysteresis loop type "F" at asymmetrical modes in magnetic switches used in Magnetic Pulse Compression Systems - MPCS. The initial state of the magnetic cores with linear magnetic characteristics at asymmetrical modes recovers naturally and the usage of the demagnetization coil is not necessary. The basic requirements for the materials used in magnetic switches are presented and the selection of materials with linear magnetic characteristics at asymmetrical modes is reasoned. A comparison between the computational power of magnetic switches, with magnetic materials with rectangular hysteresis loop type "Z" and the usage of materials with linear hysteresis loop type "F", is made.

Keywords: amorphous soft magnetic materials, amorphous and nanocrystalline materials, linear magnetic characteristics, magnetic switches, nanocrystalline soft magnetic materials, magnetic pulse compression

1. Въведение

Магнитни ключове за генериране на мощни токови импулси са изобретени за първи път от Мелвил през 1940 година и внедрени в радари във Великобритания [1]. Материалът е публикуван през 1951 година със заглавие “The Use of Saturable Inductors as Discharge Devices for Pulse Generators” – това са и първите системи за компресиране на магнитни импулси. Поради високата си цена, голям обем, липса на подходящи магнитни материали, тогава те не придобиват популярност [1].

В последните години, независимо от това старо приложение, с развитието новите феромагнитни материали и технологии магнитните ключове намират твърде разнородни и разширяващи се приложения. Това е следствие и на усъвършенстването на полупроводникови превключватели като тиристори и др., които са с отлични характеристики [1], [2], [3].

Това позволи използването на магнитни ключове с висока скорост на комутация при ниски загуби. Поради високата си честота на повторение, висока стабилност и дълъг живот получената енергия на единичните импулси, генерирана от системи за компресиране на магнитни импулси, има индустриално приложение в импулсно възбуждане на квантови генератори, ексимер лазери, ускоряване на елементарни частици, тиратрони, радиолокационни системи, източници на ултравиолетова светлина и биохимично обеззаразяване [1], [5].

В системите за компресиране на магнитни импулси най-важен компонент е магнитният ключ. Той се състои от дросел с феромагнитна сърцевина. Всички препоръки за проектиране на магнитните ключове са да се изпълняват с магнитно меки материали с нелинейни магнитни характеристики тип “Z” или познатият правоъгълен хистерезисен цикъл [5].

Процесът на комутация се осъществява поради промяна на работната точка на магнитопровода вследствие на насищане на феромагнитния материал. Магнитните ключове се характеризират с магнитна индукция на насищане и с точка на превключване. Необходимо е включването и на размагнитващи намотки, които способстват за връщането на работната точка в изходното ненаситено състояние при несиметрични режими на работа [5].

Новата предложена концепция е използването на магнитни материали с линейни характеристики тип „F” или познатият линеен хистерезисен цикъл, при което не е необходимо използването на размагнитващи намотки за правилното функциониране на ключовете при несиметрични режими [6],[7].

Поради високата честота на изменение на работната точка на магнитопровода се работи с динамичните му характеристики. При това влияят и свойствата на самия магнитен материал като магнитна еластичност и вихрови токове, които са зависими и от геометрията и конструкцията на магнитопровода. Затова и в двата случая се използват магнитопроводи с тороидална форма с цел максимално оползотворяване на възможностите на материала [4].

2. Магнитни ключове. Материали.

За дросел с тороидален магнитопровод индуктивността в ненаситено състояние може да се определи по формулата:

$$L_u = \frac{\mu_0 \mu_{ru} A_e w^2}{l} \quad (1)$$

където L_u е индуктивността на дросела в ненаситено състояние [H], μ_0 е магнитната проницаемост на вакуум [H/m], μ_{ru} е относителната магнитна проницаемост в ненаситено състояние на магнитномекия материал [-], A_e е сечението на магнитопровода [m²], w е броят на навивките на дросела [-], l е средната дължина на магнитната силова линия [m]. [1], [4]

За дросел с тороидален магнитопровод индуктивността в наситено състояние може да се определи по формулата:

$$L_s = \frac{\mu_0 \mu_{rs} A_e w^2}{l} \quad (2)$$

където L_s е индуктивността на дросела в наситено състояние [H], μ_{rs} е относителната магнитна проницаемост в наситено състояние на магнитномекия материал [-] [1], [4].

Съотношението на индуктивностите на дросела в наситено и ненаситено състояние се определя както отношението на магнитните проницаемости в съответното състояние или:

$$\frac{L_u}{L_s} = \frac{\mu_{us}}{\mu_{rs}} \quad (3)$$

На база на (3) могат да се формират и изискванията към магнитно меките материали подходящи за приложение в магнитни ключове. Те зависят от характеристиките на материала в наситено и ненаситено състояние, трябва да са висока магнитна индукция на насищане, с ниски загуби от пренамагнитване и вихрови токове (с добра междуслонна изолацията на магнитопровода), ниска магнитострикция и др. [1], [7].

Една от основните характеристики на магнитния ключ е неговата превключвателна възможност. Тъй като ширината на импулса се скъсява, при поэтапното възбуждане на системите за компресране на магнитнитни импулси, то превключвателната възможност се влошава. Въпреки това, с цел увеличаване на ефективността и подобрене на проектирането на магнитопроводи за магнитни ключове. е необходимо да се изследват и измерват характеристиките на импулса.[7]

3. Съпоставка на изчислителни мощности при два типа материали

Изчислителната мощност на електромагнитни устройства (както за дросели, така и за трансформатори) е пропорционална на произведението от сечение на магнитопровода и на прозореца на магнитопровода, в който се разполагат намотките.

$$P_{изч} \approx A_e A_w \quad (4)$$

където, A_e е сечението на магнитопровода [m^2], A_w е сечението на прозореца на магнитопровода [m^2],

При проектиране на магнитопроводи с правоъгълен хистерезисен цикъл тип „Z” (“H”) се взема под внимание, че размагнитващата намотка е с магнитовъзбудително напрежение не по-малко от това на работната. За работната намотка може да се запише следния израз:

$$wA_e \Delta B = \int_1 u dt \quad (5)$$

където w е броят на навивките на намотката (дросела) [-], A_e е сечението на магнитопровода [m^2], ΔB е изменението на работната индукция [Т], u_1 – приложеното напрежение [V], независимо от типа на магнитопровода (с правоъгълен или линеен хистерезисен цикъл). Може да се определи площта на първичната работна намотка чрез:

$$A_c = \frac{wq}{k_3} \quad (6)$$

където q е сечението проводника [mm^2], k_3 е коефициентът на запълване на намотката [-].

Ако се използва размагнитваща намотка, както е случаят с магнитопроводи от магнитно меки материали с правоъгълен хистерезисен цикъл при несиметрични режими, то нейната площ може да се изчисли по аналогичната формула - (5). Следователно за дросели, с магнитопроводи с тип „Z” (H) хистерезисни цикли площта на двете намотки се определя с уравнението:

$$A_{c\Sigma} = 2 \frac{wq}{k_3} \quad (7)$$

Изменението на работната магнитна индукция ΔB за феромагнитни материали с правоъгълен или “Z” (H) хистерезисен цикъл се определя с:

$$\Delta B_Z = B_s - (-B_r) = B_s + B_r \quad (8)$$

$$B_r \geq 0.95B_s \quad (9)$$

$$\Delta B_Z = 1.95B_s \quad (10)$$

където B_r остатъчната магнитна индукция [Т], а B_s е магнитната индукция на насищане [Т] на феромагнитния материал.

Изменението на работната магнитна индукция ΔB за феромагнитни материали с линеен или “F” (L) хистерезисен цикъл се определя с:

$$\Delta B_F = B_s - B_r \quad (11)$$

$$B_r \leq 0.05B_s \quad (12)$$

$$\Delta B_F = 0.95B_s \quad (13)$$

Така може да се определи изчислителната мощност за дросели изработени от двата типа феромагнитни материали. В общия случай за изчислителната мощност може да се запише следния израз:

$$P_{изч} = A_e A_w K \quad (14)$$

където K е коефициент, зависещ от конструкцията и електромагнитното натоварване.

За магнитопроводи с правоъгълен хистерезисен цикъл – “Z” (H) при наличие на размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза:

$$P_{uz\&L} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w \Delta B_z} 2 \frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{1.95 B_s} 2 \frac{I}{jk_3} K = 1.02 \frac{I \int u_1 dt}{B_s k_3 j} K \quad (15)$$

където j е токовата плътност [A/mm^2]

За магнитопроводи с линеен хистерезисен цикъл – “F” (L) без размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза:

$$P_{uz\&L} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w \Delta B_z} \frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{0.95 B_s} \frac{I}{jk_3} K = 1.05 \frac{I \int u_1 dt}{B_s k_3 j} K \quad (16)$$

Получената стойност за изчислителната мощност на магнитопроводи с линейни магнитни характеристики е малко по-висока като стойност при равни други условия. Това ни дава основание да заключим, че е подходящо те да бъдат използвани в определени случаи с цел елиминиране на размагнитващата намотка при несиметрични режими на работа. При симетрични режими на работа работната точка на магнитопровода се възвръща в изходно положение и без размагнитваща намотка и ефективността от използването на магнитни материали с линейни магнитни характеристики не е обосновано. Подходящи материали с линейни характеристики са аморфните и нанокристални материали, тъй като при тях линеаризацията се постига чрез специална термообработка на самия материал преди или след получаването на готовия магнитопровод.

4. Заключение

В статията е предложено ново решение с използване на магнитни материали с линеен хистерезисен цикъл в магнитни ключове работещи при несиметрични режими. С използването на тези материали се елиминира размагнитващата намотка, тъй като магнитопроводът може да се възвърне в първоначалното си работно състояние по естествен път. Направена е съпоставка на изчислителните мощности и е доказана ефективността на магнитопроводите с линейните магнитни характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Choi J. (2010), *Introduction of the Magnetic Pulse Compressor (MPC) - Fundamental Review and Practical Application*, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2010, Vol. 5, No. 3, pp. 484-492
- [2] Metglas Inc., *Pulse Power Core*, 2003-2013.
- [3] Hitachi Metals Ltd., *Nanocrystalline soft magnetic material FINEMET*, Brochure No. HL-FM10-C, 2005

- [4] Минчев М., Пенчев П. (1976), *Безконтактни апарати*, Техника, София, 1976
- [5] Меерович Л., Ватин И., Зайцев Э., Кандыкин В. (1968), *Магнитные генераторы импульсов*, Советское радио, Москва, 1968
- [6] Magnetics, *Magnetic Cores for Pulse Compression*, Application Note BULLETIN TWC-S7, 2013
- [7] Zhang D., Yan P., Sun Y., Yang J., Zhou Y., Pan R. (2009), *Characteristics of Magnetic Core in Magnetic Pulse Compression System*, Acta Physica Polonica A, 2009, Vol. 115, No. 6, pp. 1001-1003
- [8] Nunnally, W. (1982), *Magnetic Switches and Circuits*, Los Alamos, NM 87545 Report Number LA-8862-MS, pp. 01-37

Автори: Михаела Славкова, гл.ас. – катедра “Електрически апарати”, email: michaela_ds@tu-sofia.bg

Костадин Миланов, ас. – катедра “Електрически апарати”, email: k.milanow@abv.bg

Минчо Минчев, проф. дтн. – катедра “Електрически апарати”, email: mintchev@tu-sofia.bg