

CURRENT STATE AND FUTURE TENDENCIES IN DEVELOPMENT OF MAGNETIC MATERIALS

Vencislav Valchev, Technical University of Varna, vencivalchev@hotmail.com

Abstract: The paper presents current state and future trends in the development of soft magnetic materials (SMM). These SMM are developed to meet the constantly increasing requirements to SMM: decreasing core losses, increasing saturation induction, shape's variety. The paper addresses powder-metallurgy (PM) SMM, modified Spinel ferrites, Molypermalloy powder, (MPP), nanocrystalline SMM and Soft Magnetic NanoComposites (SMNC). All the materials have low core losses and high saturation induction. The paper presents their advantages, typical as well as new applications.

Keywords: soft magnetic materials, losses in magnetic materials

СЪСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА МАГНИТНИТЕ МАТЕРИАЛИ

Венцислав Вълчев, Технически Университет Варна, vencivalchev@hotmail.com

Абстракт: Статията представя състоянието и тенденциите в развитието на магнитните материали. Разгледаните магнитни материали са създадени да отговарят на постоянно нарастващите изисквания към магнитните компоненти и материали: намаляване на загубите, повишаване на индукцията на насищане, разнообразие на различни форми. Разгледани са прахово-металургичния (powder-metallurgy, PM) магнитно мек материал (MMM), модифицирани (подобвени) феритни материали, магнитен прахов материал на база молипермалой (Molypermalloy powder, MPP), нанокристални MMM и магнитно меки нанокompозити (SMNC). Всичките разгледани магнитни материали се отличават с намалени загуби и висока индукция на насищане. Представени са основните им предимства, текущи и нови приложения.

Ключови думи: магнитно меки материали, загуби в магнитните материали

Магнитно меки материали

Магнитните компоненти са ключови в днешната индустриална електроника. Бързото развитие на електронните компоненти изисква нови и подобвени магнитни материали, предназначени и за работа при по-високи честоти. Условно магнитно меките материали (MMM) се разделят на три групи:

- Нискочестотни (типична работна честота по-малка от 1 kHz);
- Високочестотни (типична работна честота над 10 kHz);
- Широколентови (типична работна честота в диапазон 50Hz ÷ 500kHz).

При мрежови (ниски) честоти най-често се използват магнитни материали на базата на железни сплави, тъй като желязото има висока индукция на насищане, както и приемлива цена на материала.

При високочестотни приложения най-широко използваните материали са ферити. Основното качество, което позволява тези им приложения е високото им съпротивление - респективно малки загуби от вихрови токове. Загубите при феритните материали се предствят чрез известното уравнение на Стейнметц (Steinmetz):

$$P_{fe} = k \cdot f^\alpha \cdot B_{pp}^\beta \quad (1)$$

където: B_{pp} е стойността на магнитната индукция от пик до пик;
 P_{fe} – загубите в магнитния материал;
 f – честотата на синусоидалното напрежение;
 k, α, β – специфични параметри за всеки феритен материал.

Уравнението на Стейнмец е приложимо само за синусоидални сигнали. В [1] е добавена и зависимост на загубите P_{NSE} от dB/dt :

$$P_{NSE} = \left(\frac{\Delta B}{2}\right)^{\beta-\alpha} \frac{k_N}{T} \int_0^T \left|\frac{dB}{dt}\right|^\alpha dt \quad (2)$$

При правоъгълно напрежение с коефициент на запълване D , уравнението (2) може да се опрости до следното уравнение:

$$P_{NSE} = k_N (2f)^\alpha B_m^\beta (2D)^{1-\alpha} \quad (3)$$

където: B_m - амплитудната стойност на магнитната индукция;
 D - коефициент на запълване на правоъгълният сигнал.

Недостатъкът на феритите е ниската индукция на насищане: до 0.35 Т. Температурната зависимост на магнитната проницаемост на феритните материали е изразена и наличието ѝ води до усложняване при оразмеряването на магнитните компоненти при някои от приложенията на феритните материали [2, 3].

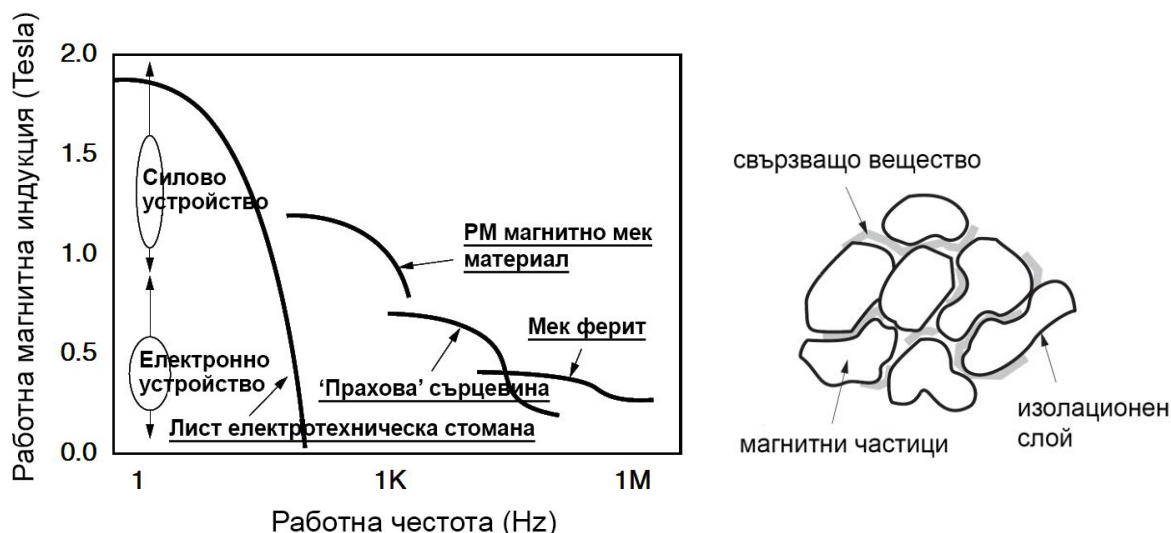
‘Широколентовите’ материали запазват основните си магнитни свойства в широк честотен диапазон. Характеризират се и с ниски загуби при високи честоти, което е втората предпоставка за приложенията им в широк честотен диапазон.

Целта на настоящия доклад е отразяването на състоянието и тенденциите при съвременните МММ. Тези МММ са получени след редица технологични подобрения, насочени да отговорят на изискванията в различни аспекти като намаляване на загубите, повишаване на индукцията на насищане и моделиране на В-Н кривата.

Прахова металургия за получаване на материали с ниски загуби и висока индукция на насищане

Един от подходите за получаване на МММ с ниски загуби е прилагането на различни металургични процеси при производството на магнитни материали. Водещ материал е прахово-металургичния (powder-metallurgy, РМ) магнитно мек материал. Материалът се състои от магнитни частици, всяка от които е изолирана от съседните с изолационен слой (фиг.1). Магнитните частици са свързани помежду си със свързващо вещество. Тази структура на материала осигурява високото му електрическо съпротивление [4].

Високото ниво на индукция и ниските загуби на материала разкриват възможните му приложения за магнитни компоненти, включително и за нискочестотния диапазон (от 50 Hz до 1 kHz). Допълнително предимство на материала РМ е възможността за проектиране и оформяне на магнитни сърцевини с различни форми.

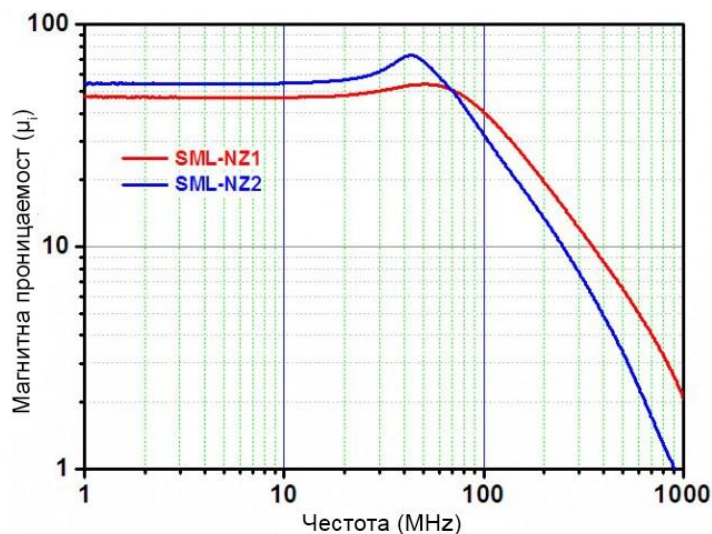


Фиг.1. Разнообразие и области на приложение на АС магнитно меките материали и композиция на РМ магнитно мек материал [4].

Важно предимство на материала спрямо другите 'прахови' материали (powder iron) е че се добавя по-малко спояващо и изолиращо вещество и РМ сърцевината е с по-висок процент на запълване на магнитния материал в напречното си сечение. Примерен РМ материал е Somaloy 500 [5], произвеждан в Япония.

Модифицирани (подобвени) феритни МММ

Феритните магнитни материали са керамични съединения на основата на MnZn и NiZn. По-малките загуби от вихрови токове при NiZn феритите спрямо MnZn се дължи на по-високото им съпротивление. Предимство на MnZn феритите е по-високата им индукция на насищане. Широко разпространените феритни материали обаче не са предназначени за приложения в мулти-мегагерцовия честотен обхват, поради намаляване на допустимата индукция и магнитната проницаемост в този диапазон. За такива приложения са подходящи модифицираните MnZn и NiZn ферити получени чрез нанотехнология [6]. Тези ферити имат голяма магнитна проницаемост, фиг.2 [6], и ниски загуби в сърцевината в честотен диапазон до 10 MHz. Сърцевините могат да бъдат изработени с различни форми и големини.



Фиг.2 Магнитна проницаемост на модифициран (Spinel) ферит спрямо честота [6].

Магнитен прахов материал на база молипермалой (Molypermalloy powder) (MPP)

Сърцевините от магнитен ‘прахов’ молипермалой (MPP) са с добра температурна стабилност, възможност за реализация на компоненти с висока индуктивност и малки загуби в сърцевината (MPP THINZ™, [7]). Материалът THINZ™ има и допълнително предимство: възможност за реализирането на форми с малка височина при по-големи мощности, фиг.3. Това качество е полезно за SMD реализациите, където магнитния компонент (индуктор) е с височина до няколко милиметра.



Фиг.3 MPP сърцевини от Micrometals Arnold Powder Cores [8]

Основното предимство на MPP магнитните материали са най-ниските им загуби в сравнение с останалите ‘прахови’ (powder) материали. Важно предимство на материала е и разпределената въздушна междина (намаляване на загубите, свързани с въздушната междина). Отсъствието на реална въздушна междина ги прави устойчиви при наличие на смущаващи електромагнитни условия, както и самия MPP компонент не влияе на околните компоненти. Тази особеност разширява приложенията им. Предимствата на MPP ги правят изключително подходящи за приложения при компоненти за импулсни трансформаторни преобразуватели и индуктори.

Нанокристални МММ

Нанокристалните МММ (фиг.4) дължат отличните си магнитни свойства (висока индукция на насищане, висока начална магнитна проницаемост, малки загуби) на специфични допълнителни подобрения, постигнати в производствения процес. Понастоящем тези материали се използват в редица приложенията с по-високи мощности в силовата електроника (специално при високи честоти), където до скоро се използваха само феритите, аморфните и т.н. прахови (iron powder) материали.



Фиг.4 Типични нанокристални сърцевини (показано NT402510P [9]).

Нанокристалните материали обикновено са на базата на състав FeSiBCuNb. Материалът е лентов с дебелина 20µm (“Finemet” –HITACHI, “Vitoperm” – VACUUMSCHMELZE, “NanoPhY” – IMPHY). Спецификата на производствения процес включва допълнителна температурна обработка при температура 500 до 550°C.

Основни приложения на нанокристални MMM:

- филтрови индуктори – поради високата стойност на B_{sat} ;
- цифрови телекомуникации;
- трансформатори за импулсни преобразуватели - високи B_{sat} и магнитна проницаемост;
- приложения при мрежови честоти;
- в битовата електроника;
- ускорителите на частици, където са необходими сърцевини с маса 50 kg и повече за силовите електронни преобразуватели и резонатори [10], [11].

Ново приложение е при индукционни ускорители в производството на енергия чрез тежки йони, където за магнитни сърцевини е необходим около 30 000 тона магнитен материал [12]. Нанокристални MMM се използват активно в мощни високочестотни трансформатори с намалени загуби, например за прилагане във високочестотните многофазни резонансни преобразуватели за международния линеен колайдер [13].

Загубите в нанокристалните MMM при типичните за силовата електроника правоъгълни напрежения $P(D)$ се представят като [14]:

$$P(D) = \left[A_e L_e \sum_{n=1}^{100} \left(\frac{U_{MK}(D, n)}{2\pi f n A_e N} \right)^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\pi f n}{z_c(j\omega)} \right) \right] \quad (4)$$

където: A_e е ефективното сечение на магнитният материал;
 L_e – средната дължина на магнитната линия;
 U_{MK} – напрежението върху тествания образец;
 D – коефициент на запълване;
 N – брой навивки;
 n – номер на хармоника;
 f – работна честота;
 z_c – импедансна функция за комплексната магнитна проницаемост.

Импедансната функция за магнитната проницаемост μ_c се дава с израза:

$$z_c(s) = s \mu_c(s) = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{s\mu}{\sigma}} \tanh \left(\sqrt{s\mu\sigma} \frac{d}{2} \right) \quad (5)$$

където: σ е електрическата проводимост;
 d - дебелината на една ламела.

Основен недостатък на нанокристалните MMM е тяхната цена (между \$40 и \$150 за килограм). Водещите производители на тези материали работят в посока за намаляване на цената и понастоящем се отчита спад в цените [15].

Магнитно Меки Нанокompозити (SMNC)

Магнитно меки нанокompозити (Soft Magnetic NanoComposites - SMNC) с относителна магнитна проницаемост от 10÷100 в честотния диапазон до 100 MHz са разработени от Spectrum Magnetics [6]. Основните предимства на нанокompозитните магнитно меки материали са голяма плътност на магнитния поток (B_s), висока температура на Кюри (T_c) и намалени загуби от вихрови токове [6]. Подходящи са за приложения в различни електронни устройства работещи в мулти-мегагерцовия обхват.

Заклучение

Представените пет вида магнитни материали отразяват съвременните тенденции в развитието на МММ. Тези магнитно меки материали са създадени да отговарят на постоянно нарастващите изискванията към магнитните компоненти и материали: намаляване на загубите при високи честоти, повишаване на индукцията на насищане, добра честотна зависимост на магнитната проницаемост и възможност за разпределена въздушна междина, където е необходимо.

На база на анализиранияте магнитни свойства са направени изводи и препоръки за доминантни приложения на разгледаните материали.

References

1. Van den Bossche A., V. C. Valchev, 'Modeling Ferrite Core Losses in Power Electronics', Journal of Int. Review of Electrical Engineering, IREE, United Kingdom, February, 2006, ISSN1827-6600.
2. Георгиев А. С. и Н. Г. Георгиева. "Избор на магнитопроводи за импулсни трансформатори". списание "Електротехника и електроника" ("Е+Е"), №10-12, 2003, ISSN 0861-4717. Стр. 54-60.
3. Georgiev A. Sl. and N. G. Georgieva. "Materials and Constructions for Magnetic Cores for Impulsed Transformers", "ICEST 2002", 1-4 October 2002, Nis, Yugoslavia. Proceedings of Papers Volume 2, ISBN 86-80135-69-0. pp. 675-678.
4. Toyoda T. H., Igarashi N., Hirose K., Mimura K., Nishioka T., Ikegaya A., Development of Super Low Iron-loss P/M Soft Magnetic Material, SEI Technical Review, Number 60, June 2005, 9
5. Sumitomo Electric Group, <http://global-sei.com/>
6. Spectrum Magnetics, <http://www.spectrum-magnetics.com>
7. MAGNETICS MPP THINZ™, BULLETIN NO. MPP-T1, 2004
8. Micrometals Arnold Powder Cores, catalogue 2011, <http://www.adamsmagnetic.com/>
9. Guangzhou QIDA Material & Technology Co., Ltd
10. Petzold J., Advantages of softmagnetic nanocrystalline materials for modern electronic applications, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242–245 (2002) 84-89
11. Vacuumschmelze GmbH & Co.KG., Nanocrystalline VITROPERM - EMC Components, 2004.
12. W. Waldron, The Heavy Ion Fusion Virtual National Laboratory, hif.lbl.gov
13. W.A. Reass, D.M. Baca, and D.E. Rees, Possibilities of high frequency polyphase resonant converters for ILC application, paper presented at the 2004 Power Modulator Conference, San Francisco, CA, 2004.
14. Vencislav C. Valchev, A. Van den Bossche, 'Core losses of nanocrystalline soft magnetic materials under square voltage', 2008, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, USA, Vol. 320, Jan., pp.53-57, ISSN 0304-8853.
15. Silveyra J., Illeková E., Coisson M., Celegato F., Vinai F., Tiberto P., Moya J., Cremaschi V., High performance of low cost soft magnetic materials, Bull. Mater. Sci., Vol. 34, No. 7, December 2011, pp. 1407–1413