

## МАГНИТОМЕХАНИЧЕН РЕЗОНАНС В ТОРОИДАЛНИ МАГНИТОПРОВОДИ

Михаела Славкова, Костадин Миланов, Минчо Минчев

*Резюме:* В статията се разглежда магнитомеханичен резонанс в тороидални магнитопроводи от магнитно меки материали с висока магнитострикция. Той се наблюдава при повишени честоти, при съвпадане на честотата на възбудителното магнитно поле с тази на механичния резонанс на тороида. Явлението е съпроводено със съществено увеличение на загубите в магнитопровода и е нежелан ефект при експлоатацията му. В работата е изследвано влиянието на съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороидални лентови магнитопроводи върху магнитомеханичната резонансна честота. Дадени са резултати от изчисления на тази честота за конкретни геометрични съотношения и различни марки магнитно меки материали. Показано е, че влиянието на съотношенията е значимо. Препоръчано е, при окончателния избор на тороидални магнитопроводи да се изчислява и честотата, при която настъпва магнитомеханичен резонанс с цел да не бъде допусната появата на явлението.

**Ключови думи:** магнитомеханичен резонанс, магнитострикция

## MAGNETOMECHANICAL RESONANCE IN TOROIDAL CORES

Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev

*Abstract:* The article examines magnetomechanical resonance in toroidal magnetic cores made of soft magnetic materials with high magnetostriction. It is observed at higher frequencies, when the frequency of the excitation magnetic field coincides with that of the mechanical resonance of the toroid. The phenomenon is accompanied by a substantial increase in core losses and is an undesirable effect at its operation. The influence of the ratio of the outer to the inner diameter of toroidal strip wound cores on the magnetomechanical resonance frequency, has been studied. Results of calculations of this frequency are given for specific geometric ratios and various soft magnetic materials. It has been shown that the influence of the ratios is significant. It is recommended for the final selection of toroidal magnetic cores, to be calculated the frequency at which magnetomechanical resonance occurs so as to prevent the occurrence of the phenomenon.

**Keywords:** magnetomechanical resonance, magnetostriction

## 1. Въведение

Резонансът е явление, при което честотата на външното въздействие се изравнява с честотата на собствените трептения на системата и е съпроводено с рязко нарастване на амплитудата на принудените механични трептения, които достигат своя максимум. В механичните конструкции резонансът води до усилване на механичните вибрации като резонансната честота зависи от формата, размера и др. конструктивни и механични параметри на системата (инерционен момент, модул на Юнг и др.) [1-5]. При намагнитването на магнитно меки материали, с различна от нула магнитострикция, може да се наблюдава резонанс вследствие на наслагване на честотата на механичните трептения причинени от магнитострикцията с тази на механичния резонанс. Тогава настъпва явлението магнито-механичен резонанс (magnetomechanical resonance) или магнитоеластичен резонанс (magnetoelastic resonance), което е съпроводено с рязко увеличаване на загубите в магнитопровода. Това може да доведе до появата на пукнатини или разрушаването му и затова е от особена важност да се изчисли предварително честотата, при която може да настъпи магнитомеханичен резонанс за дадения магнитопровод, с цел да се избегне работа му при тези честоти [1-5].

Магнитострикцията ( $\lambda_s$ ) е явление, при което се променят размерите на феромагнитния материал по време на намагнитването му. Причина за магнитострикцията е диполното взаимодействие между магнитните моменти на електроните, което зависи от междуатомното разстояние и в аморфните феромагнетици се определя от неподредени атомни конфигурации. Магнитострикцията зависи от първоначалната композиция на сплавта.

В **Таблица 1** са представени стойностите на магнитострикцията за някои магнитно меки сплави [6, 7-15].

С високи стойности на магнитострикцията се отличават - аморфна сплав на желязна основа, два типа пермалой и висококачествен ферит, а аморфните сплави на кобалтова основа са с близка до нула магнитострикция [6].

Създадени са аморфни и нанокристални сплави на кобалтова основа с нулева магнитострикция. Магнитострикцията силно се влияе от съдържанието на силиций (Si) в  $\alpha$ -Fe нанокристалите, но не и от съдържанието на силиций в аморфната фаза [3, 7-15]. Термообработката може в значителна степен да намали големината на магнитострикцията и сплавта с по-високо съдържание на силиций да се окаже с по-ниска магнитострикция [3, 7-15].

Характерно е, че за материалите с линеен (F) хистерезисен цикъл, процесът на намагнитването е контролиран от ротацията на вектора на намагнитване в приложеното поле. А при материалите с правоъгълен или (Z) хистерезисен цикъл намагнитването се определя от преместването на 180 градусовите доменни граници, което не води до промяна в дължината на материала [9].

В [1] явлението магнитомеханичен резонанс е наблюдавано в тороидални лентови магнитопроводи, изработени от богати на желязо аморфни сплави, характеризиращи се с висока индукция на насищане, с висока магнитострикция и с ниска магнитна анизотропия (Metglas 2605SM и Metglas 2605S-3A). Те са с висок коефициент на магнитомеханично куплиране.

Таблица 1

МАТЕРИАЛ	СЪСТАВ НА СПЛАВТА	ЗАГУБИ (20kHz, 200mT)	МАГНИТНА ИНДУКЦИЯ НА НАСИЩАНЕ	МАГНТО СТРИЦИЯ	ОТНОСИТЕЛНА МАГНИТНА ПРОНИЦАЕМОСТ (50Hz)	МАКСИМАЛНА РАБОТНА ТЕМПЕРАТУРА
		[W/kg]	B <sub>s</sub> , [mT]	λ <sub>s</sub> , [10 <sup>-6</sup> ]	μ <sub>i</sub> - μ <sub>max</sub> , [-]	[°C]
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКА СТОМАНА (НАДЛЪЖНО ОРИЕНТИРАНА)	Fe <sub>97</sub> Si <sub>3</sub>	> 1.000	2.000	9	2.000 - 35.000	~120
ПЕРМАЛОЙ ТИП I (СТАНДАРТЕН)	Ni <sub>45</sub> Fe <sub>55</sub>	> 150	1.550	25	12.000 - 80.000	130
ПЕРМАЛОЙ ТИП II (СТАНДАРТЕН)	Ni <sub>54</sub> Fe <sub>46</sub>	> 100	1.500	25	60.000 - 125.000	130
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКА СТОМАНА (УСЪВЪРШЕНСТВАНА)	Fe <sub>93,5</sub> Si <sub>6,5</sub>	40	1.300	0.1	16.000	130
АМОΡΦНА СПЛАВ НА Fe ОСНОВА	Fe <sub>76</sub> (Si,B) <sub>24</sub>	18	1.560	27	6.500 - 8.000	150
ВИСОКОКАЧЕСТВЕН ФЕРИТ	MnZn	17	500	21	1.500 - 15.000	100/120
ПЕРМАЛОЙ (УСЪВЪРШЕНСТВАНА)	Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub>	> 15	800	1	150.000 - 300.000	130
АМОΡΦНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА A	Co <sub>73</sub> (Si,B) <sub>27</sub>	5.0	550	< 0.2	100.000 - 150.000	90/120
АМОΡΦНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА B	Co <sub>77</sub> (Si,B) <sub>23</sub>	5.5	820	< 0.2	2.000 - 4.500	120
АМОΡΦНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА C	Co <sub>80</sub> (Si,B) <sub>20</sub>	6.5	1.000	< 0.2	1.000 - 2.500	120
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП I	FeCuNbSiB	4.0	1.230	0.1	20.000 - 200.000	120/180
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП II	FeCuNbSiB	4.5	1.350	2.3	20.000 - 200.000	120/180
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП III	FeCuNbSiB	8.0	1.450	5.5	~ 100.000	120/180

Това означава, че при определена честота на възбудителното поле може да настъпи резонансно явление, обусловено от наслагването на механичния резонанс с честотата на възбудителното поле. За определяне на честота, при която може да настъпи магнитомеханичен резонанс там се извежда формула за тороидален магнитопровод като използват апроксимацията с трептящ тънък пръстен: [1]

$$f_n = \frac{1}{l_{Fe}} \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}}, \text{ Hz (1)}$$

където

$l_{Fe}$  е дължината на средната магнитна линия на магнитопровода,  $m$

$E$  е модулът на Юнг,  $N/m^2$

$D$  ( $\rho$ ) е плътността на материала,  $kg/m^3$

$n$  цяло число, представящо броя от всички стоящи вълни насложени върху основните трептения ( $n=0$ ) като най-високата стойност на  $n=8$ .

При наличие на магнитомеханични явления, механичните резонанси ще причинят съществено увеличение на загубите  $L$  при резонансните честоти. Пак от същия източник [1] се дава характеристиката на измерваните загуби  $L$  в

магнитопровода като функция на честотата в отсъствие на магнитоотрицателно обусловени механични резонанси.

$$(L/f) = P_h + P_e f \quad (2) \quad \left(\frac{L}{f}\right) = P_h + P_e f, \text{ J/kg} \quad (2)$$

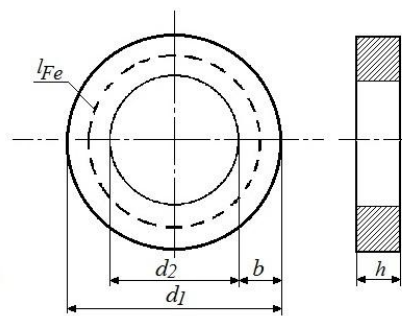
където  $f$  е възбудителната честота ( $< 100\text{kHz}$ ), а  $(P_h)$  и  $(P_e f)$  са съответно загубите от хистерезис и загубите от вихрови токове в магнитопровода за цикъл. Уравнение (2) представя собствените или магнитни загуби.

## 2. Цел

Целта на статията е да се изследва влиянието на съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороидални лентови магнитопроводи със стандартизирани конструктивни параметри според IEC 60635:1978/AMD1:1997/ DIN 42311:1980-01, изработени от магнитно меки материали с висока магнитоотрицателна върху честотата, при която настъпва магнитомеханичен резонанс. Изведени са специфични зависимости за определяне на тази резонансна честота.

## 3. Обосновка

Тороидалните лентови магнитопроводи са магнитни вериги без въздушна междина, с постоянно сечение. На *Фигура 1* са дадени основните размери на магнитопроводите [16].



*Фигура 1 Основни размери на тороидални магнитопроводи*

където  $d_1$  е външен диаметър,  $d_2$  е вътрешен диаметър на магнитопровода,  $h$  е височината на магнитопровода и зависи от ширината на лентата,  $b$  е дебелина на магнитопровода, а  $l_{Fe}$  е средната дължина на магнитната силова линия

Стандартът, който е ползван е IEC 60635:1978 или DIN 42311, който се отнася за лентови тороидални магнитопроводи от магнитно мек материал [16]. Той включва изисквания към размерите на лентата, препоръки за дебелина на лентата, защита на магнитопровода и коефициент на запълване.

За магнитопровода са известни следните отношения, дефинирани в стандарта:

$$d_1 = k_1 \cdot d_2 \quad (3)$$

на база на (3) получаваме (4)

$$l_{Fe} = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{k_1 \cdot d_2 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{d_2(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi = d_2 \cdot \frac{(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi \quad (4)$$

От тук, имайки предвид (1) - зависимостта изведена в [1], може да се запише следния израз - (5)

$$f_n = \frac{1}{l_{Fe}} \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}} = \frac{1}{d_2 \cdot \frac{(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi} \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}} = \frac{1}{d_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}} \quad (5)$$

След окончателна преработка получаваме (6)

$$f_n = \frac{1}{d_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}} \quad (6)$$

Поради нехомогенността на полето в радиално направление за тороидални лентови магнитопроводи съществуват препоръчителни съотношения между външния  $d_1$  и вътрешния  $d_2$  диаметър. В стандарт IEC 60635:1978/AMD1:1997 и DIN 42311:1980-01 са дадени три основните съотношения на външния към вътрешния диаметър на тороида съответно  $k_1 = 1.25$ ;  $1.6$  и  $2.0$ . Оттук може да се изведат и три честоти на магнитомеханичен резонанс в зависимост от съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороида. Т.е. независимо от факта, че три магнитопровода са с еднакъв вътрешен диаметър, изработени са от един и същ магнитно мек материал, в зависимост от съотношението  $k_1$  резонансните явления настъпват при различна честота. Данните и съответните изрази са дадени в **Таблица 2**

**Таблица 2**

съотношение	$k_1 = d_1/d_2 = 1.25$	$k_1 = d_1/d_2 = 1.6$	$k_1 = d_1/d_2 = 2.0$
множител	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} = 0.28$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} = 0.24$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} = 0.16$
магнитомеханична резонансна честота	$f_n = \frac{0.28}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}}$	$f_n = \frac{0.24}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}}$	$f_n = \frac{0.16}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2 + 1) \frac{E}{D}}$
брой стоящи вълни	$n=0$	$n=0$	$n=0$
магнитомеханична резонансна честота	$f = \frac{0.28}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.24}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.16}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$

Известно е, че за материали с правоъгълен хистерезисен цикъл съотношението на външния към вътрешния диаметър  $k_1 = d_1/d_2$  трябва да е не по-голямо от 1.25 всеки път, когато е възможно. За останалите материали отношение по-голямо от 2 не трябва да се превишава [6, 12, 13]. За материали с правоъгълен хистерезисен цикъл се предлагат още две съотношения  $k_1 = 1.10$  и  $1.05$ . За тях данните са представени в **Таблица 3**.

Магнитомеханичен резонанс може да настъпи не само в лентови, но и в магнитопроводи, направени от ферити. По данни от Ferroxcube [2], формулата за изчисление на хармоничната резонансна честота за магнитопроводи от MnZn е:

$$f_r = \frac{5700}{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)}, \text{ kHz (7)}$$

където  $d_1$  е външния диаметър [mm], а  $d_2$  е вътрешния диаметър [mm] на магнитопровода.

**Таблица 3**

съотношение	$k_1 = d_1/d_2 = 1.10$	$k_1 = d_1/d_2 = 1.05$
множител	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} = 0.30$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} = 0.31$
магнитомеханична резонансна честота	$f_n = \frac{0.30}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2 + 1)} \frac{E}{D}$	$f_n = \frac{0.31}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2 + 1)} \frac{E}{D}$
брой стоящи вълни	$n=0$	$n=0$
магнитомеханична резонансна честота	$f = \frac{0.30}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.31}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$

В [4] се използва аналогична на (1) формула за изчисление на магнитомеханичната резонансната честота :

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ Hz (8)}$$

където

$r$  е радиусът на средната магнитна линия на магнитопровода,  $m$

$r = l_{Fe} / 2\pi$ ,  $m$

$E$  е модулът на Юнг,  $N/m^2$

$D$  ( $\rho$ ) е плътността на материала,  $kg/m^3$

Като се преработи (8) се стига до израза:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{l_{Fe}}{2\pi}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{l_{Fe}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ (9)}$$

$$l_{Fe} = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{k_1 \cdot d_2 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{d_2(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi = d_2 \cdot \frac{(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi \text{ (4)}$$

$$f_r = \frac{1}{l_{Fe}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{d_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1 + 1)} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ (10)}$$

Изразът (10) е аналогичен на тези, получени в **Таблица 2** и **Таблица 3**.

В **Таблица 4** са дадени изчисленияте магнитомеханични резонансни честоти за магнитопровод изработен от три марки аморфни магнитно меки метални сплави.

Таблица 4

<i>материал</i>	$d_1$	$d_2$	$l_{Fe}$	$r_{Fe}$	$k_1$	$E$	$\rho$	$f$
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	-	$GN/m^2$	$kg/m^3$	$kHz$
<i>Metglass 2605SA1</i>	0.020	0.016	0.0565	0.0090	1.25	110	7180	68.5
<i>Metglass 2605HBM1</i>	0.020	0.016	0.0565	0.0090	1.25	120	7330	70.8
<i>Metglass 2605CO</i>	0.020	0.016	0.0565	0.0090	1.25	110	7560	66.7

В **Таблица 5** са дадени изчислените магнитомеханични резонансни честоти за три магнитопровода с еднакъв вътрешен диаметър, но различни външни диаметри, които са изработени от една и съща аморфна метална сплав.

Таблица 5

<i>материал</i>	$d_1$	$d_2$	$l_{Fe}$	$r_{Fe}$	$k_1$	$E$	$\rho$	$f$
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	-	$GN/m^2$	$kg/m^3$	$kHz$
<i>Metglass 2605S-3</i>	0.020	0.016	0.0565	0.0090	1.25	167	7300	83.7
<i>Metglass 2605S-3</i>	0.025	0.016	0.0644	0.0103	1.60	167	7300	71.7
<i>Metglass 2605S-3</i>	0.032	0.016	0.0754	0.0120	2.00	167	7300	47.8

Целта е да се покаже, че независимо от факта, че магнитопроводите са с еднакъв вътрешен диаметър и са от един и същ магнитно мек материал, магнитомеханичният резонанс може да настъпи при различна честота в зависимост от съотношението на външния към вътрешния диаметър. Колкото по-голямо е съотношението между външния и вътрешния диаметър на магнитопровода, толкова по-ниска е резонансната честота на магнитомеханичния резонанс при равни други условия.

## 5. Заключение

От направените проучвания и изчисления във връзка с явлението магнитомеханичен резонанс в тороидални лентови магнитопроводи може да се обобщи, че колкото по-голямо е съотношението между външния и вътрешния диаметър на магнитопровода, толкова по-ниска е резонансната честота на магнитомеханичния резонанс при равни други условия.

Във връзка с безопасната работа на тороидалните лентови магнитопроводи от магнитно меки материали с висока магнитострикция е желателно предварително да се изчисли честотата на магнитомеханичния резонанс, за да се избегне неговата поява.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ramanan, V.R.V., Smithr, C.H., Barberi, L., (1985) *Magnetomechanical resonant losses in metallic glasses*, J.Appl.Phys 57 (1), 1985, pp.3493-3495
- [2] Ferroxcube, (2008) *Data sheet 3R1 Material specification*, 2008
- [3] Lashgari, H.R., Chu, D., Shishu Xie, Huande Sun, Ferry, M., Li, S., (2014) *Composition dependence of the microstructure and soft magnetic properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys: A review study*, J.Non-Cryst.Solids 391, 2014, pp. 61-82

- [4] Thottuvelil, V., Wilson, T., Owen, H., (1984) *Unusual High-Frequency Behavior of Some Amorphous Metallic-Alloy Tape-Wound Magnetic Cores*, IEEE Trans. Man. 20 (4), 1984, pp.570-578
- [5] Schwarz, R. B., Kuokkala, V.-T., (1992), *Magnetostrictive resonance excitation*, US 5150617 A, 1992
- [6] Ferch, M., (2003), *Nanocrystalline core materials for modern power electronic designs*, MAGNETEC GmbH., Langenselbold, Germany, 2003
- [7] Herzer, G., (1997) *Nanocrystalline soft magnetic alloys*, Handb. Magn. Mater. 10 (3), Elsevier, 1997, pp.415-462.
- [8] Herzer, G., (2013) *Application oriented development of amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials*, VAC GmbH., Hanau, Germany, 2013
- [9] Liebermann, H., (1993) *Rapidly Solidified Alloys: Processes, Structures, Properties, Applications*, Marcel Dekker, NY-Basel-Hong Kong, 1993
- [10] Honeywell & Allied Signal Inc., (2001), *High frequency cores for electronics, Products and Solutions*, 2001
- [11] VAC GmbH., (1989) *Amorphous metals VITROVAC alloys and applications*, PV-006, Hanau, 1989.
- [12] VAC GmbH., Boll, R. (1990) *Weichmagnetische Werkstoffe*, Hanau, 1990
- [13] VAC GmbH., (1996) *Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products*, Hanau, 1996.
- [14] VAC GmbH., (1989) *Toroidal strip wound cores of VITROVAC 6025Z*, PV-007, Hanau, 1989.
- [15] VAC GmbH., (1983) *Toroidal Strip Wound Cores*, FS-M 10, Hanau, Germany, 1983
- [16] *IEC 60635:1978 / AMD1:1997 Toroidal strip wound cores made of magnetically soft material / DIN 42311:1980 -01*

**Автори:** Михаела Славкова, ас. д-р от Технически университет - София; катедра „Електрически апарати”, *email: [michaela\\_ds@tu-sofia.bg](mailto:michaela_ds@tu-sofia.bg)*;

Костадин Миланов, гл. ас. д-р от Технически университет - София; катедра „Електрически апарати”, *email: [kmilanow@tu-sofia.bg](mailto:kmilanow@tu-sofia.bg)*

Минчо Минчев, проф д-р от Технически университет - София; катедра „Електрически апарати”, *email: [mintchev@tu-sofia.bg](mailto:mintchev@tu-sofia.bg)*