

## МАГНИТНО ПОЛЕ НА ВИХРОВА МАШИНА СЪС СФЕРИЧЕН ИНДУКТОР

Константин Костов, Константин Тричков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: costovs@yahoo.com

**РЕЗЮМЕ.** Изчислява се първо полето, създадено от една фаза на сферичен индуктор на вихрова машина, използвана за обработване на вещества чрез въртящо се магнитно поле. Последният има три фазни намотки, чиито оси съвпадат с координатните. След това се изчислява резултантното въртящо се магнитно поле, което във всеки момент се получава от сумирането на полетата на две от фазните намотки. Резултатът е представен в ред от сферични хармоници.

### MAGNETIC FIELD OF VORTEX MACHINE WITH SPHERICAL STATOR

Konstantin Kostov, Konstantin Trichkov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, E-mail: costovs@yahoo.com

**ABSTRACT.** First is calculated the field, produced by a phase coil of spherical inductor of vortex machine. That machine is used for treatment of materials by means of rotating magnetic field. There are three phase coil in the inductor. Their axes coincide with the three Cartesian coordinates. Then the resultant rotating magnetic field is obtained by summation of the fields of two of the phase coils. Results obtained are expressed as a series of spherical harmonics.

Вихровите машини се използват за интензифициране на някои технологични процеси, като смилане, емулгиране, смесване и др., чрез въртящо се поле, действащо върху ферромагнитни работни частици. В (Костов и Тричков, 2007) се предлага машина със сферичен индуктор и се определя скаларният магнитен потенциал за една фаза  $u_{\mu\phi}$ :

$$u_{\mu\phi}(r, \theta) = \frac{-F_{\phi 1 \max} + 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} r \cos \theta - \frac{0,8F_{\phi 3 \max}}{R^3} r^3 (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta). \quad (1)$$

Да намерим компонентите на магнитния интензитет за една фаза:

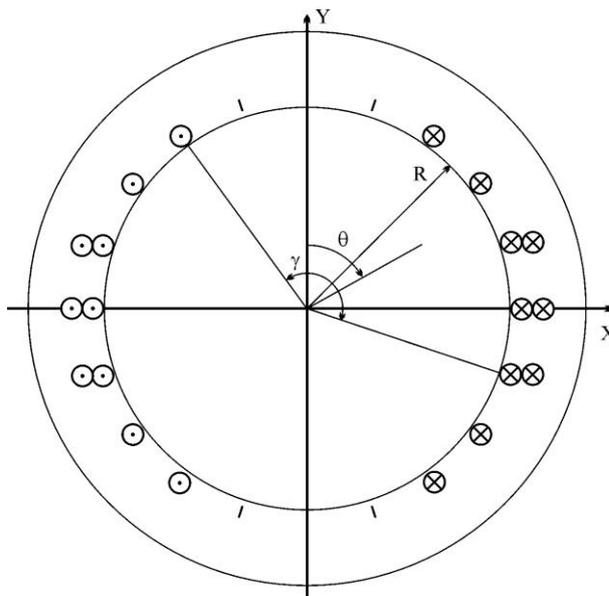
$$H_{\phi r} = -\frac{\partial u_{\mu\phi}}{\partial r} = \frac{F_{\phi 1 \max} - 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} \cos \theta + \frac{2,4F_{\phi 3 \max}}{R^3} r^2 \cos \theta (5 \cos^2 \theta - 3),$$

$$H_{\phi \theta} = -\frac{\partial u_{\mu\phi}}{r \partial \theta} = \frac{-F_{\phi 1 \max} + 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} \sin \theta - \frac{2,4F_{\phi 3 \max}}{R^3} r^2 \sin \theta (5 \cos^2 \theta - 1). \quad (2)$$

Можем да разложим полето на сума от две съставни части. Първата е с компоненти

$$H'_{\phi r} = \frac{F_{\phi 1 \max} - 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} \cos \theta = H'_{\phi} \cos \theta,$$

$$H'_{\phi \theta} = \frac{-F_{\phi 1 \max} + 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} \sin \theta = -H'_{\phi} \sin \theta.$$



Фиг. 1. Схема на една фаза от намотката

Както се вижда, това поле не зависи от текущия радиус и в разглеждания момент  $\omega t = \pi/2$ , когато фазовият ток е максимален, за всяка точка е вектор с модул

$$H'_\phi = \frac{F_{\phi 1 \max} - 0,6F_{\phi 3 \max}}{R} \quad (3)$$

и посока по оста на намотката, съвпадаща с положителната посока на оста  $Y$ , Фиг. 1. Полето е пулсиращо във времето, с амплитуда  $H'_\phi$ . Във формирането му участва и третият пространствен Фуриеров хармоник на магнитния потенциал. Да оценим влиянието му върху амплитудата  $H'_\phi$  на хомогенната съставка на полето. Заместваме

$$F_{\phi 1 \max} = 2\sqrt{2} \frac{wk_{w1}}{\pi} I, \quad F_{\phi 3 \max} = 2\sqrt{2} \frac{wk_{w3}}{3\pi} I.$$

Коефициентите на намотката са съответно

$$k_{w1} = k_{q1}k_{y1}, \quad k_{w3} = k_{q3}k_{y3}.$$

Както ще видим, тук се предлага създаването на въртящото поле чрез двуфазна намотка. В такъв случай съществуват третият и кратните на три хармоници в резултатното м.д.н. Ако фазната зона е  $120^\circ$ , те се елиминират, но така се намалява значително коефициентът на разпределение за основния хармоник. Компромисният вариант е фазна зона  $\alpha = 90^\circ$ . Ако приемем, че намотката е равномерно разпределена (броят на каналите за полюс и фаза е безкраен), коефициентите на разпределение за двата хармоника са съответно

$$k_{q1\infty} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2} = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\pi/4} = 0,900,$$

$$k_{q3\infty} = \frac{\sin 3\frac{\alpha}{2}}{3\alpha/2} = \frac{\sin 3\frac{\pi}{4}}{3\pi/4} = 0,300.$$

За намаляване на влиянието на висшите хармоници е логично да се приеме относителна стъпка  $\beta = 3/4$ . Това обаче води до значително намаляване на  $k_{y1}$  и твърде голям коефициент на скъсяване за седмия хармоник, така че  $k_{y1} = k_{y7}$ . Ето защо се приема  $\beta = 4/5$ , при което петият хармоник на м.д.н. изчезва. Тогава коефициентите на скъсяване са

$$k_{y1} = \sin \beta \frac{\pi}{2} = \sin \frac{4}{5} \frac{\pi}{2} = 0,951,$$

$$k_{y3} = \sin 3\beta \frac{\pi}{2} = \sin 3 \frac{4}{5} \frac{\pi}{2} = -0,588.$$

Следователно

$$k_{w1} = k_{q1}k_{y1} = 0,900 \cdot 0,951 = 0,856,$$

$$k_{w3} = k_{q3}k_{y3} = -0,300 \cdot 0,588 = -0,176.$$

Заместваме в (3)  $F_{\phi 1 \max}$ ,  $F_{\phi 3 \max}$  и получените стойности за  $k_{w1}$  и  $k_{w3}$ :

$$\begin{aligned} H'_\phi &= 2\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} I(k_{w1} - 0,2k_{w3}) = \\ &= 2\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} I(0,856 + 0,2 \cdot 0,176) = 1,782\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} I. \end{aligned} \quad (4)$$

Вижда се, че влиянието на третия Фуриеров хармоник в разпределението на магнитния потенциал по граничната окръжност е слабо върху амплитудата на хомогенното поле  $H'_\phi$ . В конкретния случай на поле на една фаза, то е положително.

Втората съставна част на полето е

$$\begin{aligned} H''_{\phi r} &= \frac{2,4F_{\phi 3 \max}}{R^3} r^2 \cos \theta (5 \cos^2 \theta - 3) = G_\phi r^2 \cos \theta (5 \cos^2 \theta - 3), \\ H''_{\phi \theta} &= -\frac{2,4F_{\phi 3 \max}}{R^3} r^2 \sin \theta (5 \cos^2 \theta - 1) = -G_\phi r^2 \sin \theta (5 \cos^2 \theta - 1), \end{aligned}$$

където

$$G_\phi = \frac{2,4F_{\phi 3 \max}}{R^3}.$$

За да оценим нехомогенността, която внася тази съставка на полето, да намерим модула на вектора ѝ за разглеждания момент  $\omega t = \pi/2$ :

$$|H''_\phi| = |G_\phi| r^2 \sqrt{\cos^2 \theta (5 \cos^2 \theta - 3)^2 + \sin^2 \theta (5 \cos^2 \theta - 1)^2}.$$

За  $r = const.$  максимумът на  $|H''_\phi|$  зависи само от израза под корена

$$\begin{aligned} s &= \cos^2 \theta (5 \cos^2 \theta - 3)^2 + \sin^2 \theta (5 \cos^2 \theta - 1)^2 = \\ &= 25 \cos^4 \theta (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) - 30 \cos^4 \theta + 9 \cos^2 \theta - \\ &- 10 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 5 \cos^4 \theta - 2 \cos^2 \theta + 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Намираме производната  $ds/d\theta$  и я приравняваме на нула:

$$\sin \theta \cos \theta (-5 \cos^2 \theta + 1) = 0.$$

В израза за  $s$  неизвестното  $\theta$  участва чрез  $\cos^2 \theta$ . Затова ще определим само  $\cos^2 \theta$ :

$$\sin \theta = 0 \Rightarrow \cos^2 \theta = 1; \quad \cos^2 \theta = 0; \quad \cos^2 \theta = 1/5.$$

Заместваме получените стойности за  $\cos^2 \theta$  в (5) и получаваме за  $s$  съответно:

$$s_1 = 5.1 - 2.1 + 1 = 4; \quad s_2 = 5.0 - 2.0 + 1 = 1;$$

$$s_3 = 5.1/25 - 2.1/5 + 1 = 4/5.$$

Максималната му възможна стойност е  $s = s_1 = 4$ . Следователно

$$|H''_{\phi \max}| = |G_{\phi}| r^2 \sqrt{s_1} = \left| \frac{2.4}{R^3} 2\sqrt{2} \frac{wk_{w3}}{3\pi} I \right| r^2 \sqrt{4}. \quad (6)$$

След заместване на  $|k_{w3}| = 0,176$  се получава

$$|H''_{\phi \max}| = \frac{3,2\sqrt{2}w0,176}{\pi R} \left(\frac{r}{R}\right)^2 I = 0,563\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} \left(\frac{r}{R}\right)^2 I.$$

Вижда се, че  $|H''_{\phi \max}|$  бързо намалява при отдалечаване от обвода на индуктора. Да сравним хомогенната и нехомогенната съставка при  $r = 0,8R$ . От (4) и последния израз за  $|H''_{\phi \max}|$  се получава

$$\frac{|H''_{\phi \max}|}{H'_{\phi}} = \frac{0,563\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} 0,8^2 I}{1,782\sqrt{2} \frac{w}{\pi R} I} = 0,202.$$

На пръв поглед нехомогенната съставка е значителна. Трябва обаче да се вземе предвид, че се разглежда най-неблагоприятният случай – полето в точка с такава стойност на  $\theta$ , при която  $H''_{\phi}$  има максимум.

Да сравним сега магнитните интензитети, създадени от първия и третия хармоници на една фазна намотка при цилиндрична неявнополусна и при сферична вихрова машина. За тази цел първо определяме амплитудата на м.д.н.  $F_{\phi\nu}$  на една фазна намотка на цилиндрична машина (Вольдек, 1966):

$$F_{\phi\nu} = 2\sqrt{2} \frac{wk_{w\nu}}{\nu\pi} I = \frac{2\sqrt{2}}{\nu} k_{w\nu} \frac{A_{\nu}}{m} R,$$

където

$$A_{\nu} = \frac{m\nu I}{\pi R} \text{ е линейно токово натоварване на}$$

цилиндричната вихрова машина; създава се от  $m$ -те фазни намотки.

В цилиндрична вихрова машина модулът на  $\nu$ -тия хармоник на интензитета на резултантното поле на всички фази е (Костов, 1987)

$$H_{\nu} = \sqrt{2} k_{w\nu} A_{\nu} \left(\frac{r}{R}\right)^{\nu-1}.$$

Линейното токово натоварване от една фаза на намотката е  $A_{\nu\phi} = A_{\nu}/m$ . Следователно амплитудата на  $\nu$ -тия хармоник на интензитета на полето, създадено от една фазна намотка, е

$$|H_{\phi\nu}| = \frac{2}{m} |H_{\nu}| = 2\sqrt{2} |k_{w\nu}| A_{\nu\phi} \left(\frac{r}{R}\right)^{\nu-1}.$$

Амплитудите на първия и на третия хармоник са съответно

$$|H_{\phi1}| = 2\sqrt{2} k_{w1} A_{\nu\phi} \text{ и } |H_{\phi3}| = 2\sqrt{2} |k_{w3}| A_{\nu\phi} \left(\frac{r}{R}\right)^2.$$

Съгласно (3) първият хармоник на м.д.н. на една фазна намотка на сферична вихрова машина създава магнитен интензитет с амплитуда

$$|H_{\phi1}| = \frac{F_{\phi1 \max}}{R} = \frac{2\sqrt{2} wk_{w1}}{\pi R} I.$$

Като вземем под внимание, че при сферичната вихрова машина линейното токово натоварване от една фаза е

$$A_{c\phi\phi} = \frac{wI}{\pi R}, \text{ намираме}$$

$$|H_{\phi1}| = 2\sqrt{2} k_{w1} A_{c\phi\phi}.$$

От (6), като държим сметка за гореспоменатата формула за  $A_{c\phi\phi}$ , получаваме друга формула за максимума на

$$|H''_{\phi}| \text{ при изменение на } t \text{ и } \theta:$$

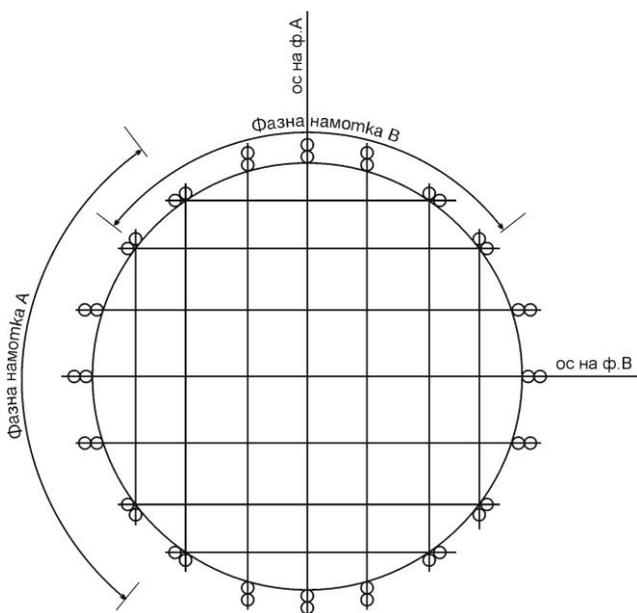
$$|H''_{\phi \max}| = \left| \frac{4,8}{R^3} \sqrt{2} \frac{wk_{w3}}{3\pi} I \right| r^2 2 = 3,2\sqrt{2} |k_{w3}| A_{c\phi\phi} \left(\frac{r}{R}\right)^2.$$

Да направим сега сравнение между полетата, възбудени от една фазна намотка, за двата случая. Виждаме, че при еднакви коефициенти на намотките за първия хармоник и еднакво линейно натоварване от една фазна намотка, амплитудите на основните хармоници на полето за двете машини са еднакви. Същевременно полетата, създадени от третите хармоници на м.д.н. се различават – максималната стойност на  $|H''_{\phi}|$  е 1,6 пъти по-голяма от съответната величина  $|H_{\phi3}|$  при цилиндричната машина. Разбира се, и тук трябва да се има предвид, че при цилиндрична вихрова машина  $|H_{\phi3}|$  за  $r = const.$  не се променя, докато при сферичната  $|H''_{\phi}|$  зависи и от  $\theta$ , като тук е приведена максималната му стойност. Ето защо може да се направи извод, че полето, възбудено от една

фаза на сферична машина, е хомогенно в почти същата степен, в която е и полето на една фаза на цилиндричната.

Както доказахме, полето, създадено от първия Фуриеров хармоник на м.д.н. е хомогенно. То е по направление на оста на фазната намотка и е пулсиращо. Три еднакви намотки, чиито оси са разположени в една равнина, сключват помежду си ъгъл  $120^\circ$  и са захранени със симетрична трифазна система от напрежения, осъществяват въртящо се магнитно поле. Такова поле предизвиква въртене само в равнини, успоредни на равнината на фазните оси, точно както е при цилиндричната вихрова машина. В сферичната вихрова машина е удачно използването на три фазни намотки, чиито оси са разположени като осите на Декартова координатна система  $XYZ$  с начало в центъра на сферата. Намотките са еднакви, положени са в пръстеновидни канали и са с фазна зона  $90^\circ$ . Секциите представляват окръжности и са без челни съединения. За да е скъсена намотката в електромагнитно отношение, в средните канали на фазната група се полагат секции с удвоен брой навивки. На Фиг. 2 са показани схематично две от фазните намотки. Оста на третата е перпендикулярна на равнината на чертежа. Както ще видим, винаги работят две фазни намотки. Следователно за даден момент това е действащата намотка на машината. Тук

$$z = 20, 2p = 2, \tau = 10, y = 8, \beta = 4/5.$$



Фиг. 2

Ще разгледаме полето, възбудено от първия хармоник на м.д.н. Във всеки момент се захранват само две от намотките с двуфазна симетрична система напрежения. Както е известно, това са две напрежения с еднакви честоти и амплитуди, дефазирани на  $90^\circ$ . Всяка от намотките създава хомогенно поле. Векторите на двете полета са взаимно перпендикулярни в пространството, пулсират с равни честоти и амплитуди и са дефазирани на  $90^\circ$ . Следователно тяхното резултантно поле е кръгово

Препоръчана за публикуване от катедра "Електротехника", МЕМФ

въртящо се, като модулът  $H_1$  на вектора му е равен на амплитудата на всяко от двете полета:

$$H_1 = \frac{F_{\phi 1 \max}}{R} = \frac{2\sqrt{2} w k_{w1} I}{\pi R} = \sqrt{2} k_{w1} A_{c\phi},$$

където

$$A_{c\phi} = \frac{2wI}{\pi R}$$

е линейното токово натоварване на сферичната вихрова машина (създава се от две фазни намотки). През определен период от време се сменят двойките захранвани фазни намотки, така че всяка от намотките има два работни периода и един – пауза. По този начин се осъществява основното предимство на сферичната вихрова машина – въртене на работните частици в различни равнини. Това позволява по-добро смесване на обработваемия материал от различни слоеве, съответстващи на равнините на въртенето им.

Сечението на проводника на фазните намотки се изчислява, като се взема под внимание, че работят в прекъснат режим. Намотката е с минимална дължина на проводника по отношение на обхванатия от нея активен обем. Поради това са минимални вложената мед и загубите в нея. Трябва също да се отбележи липсата на разсейване на челните съединения.

Възможно е да се конструира и явноплюсен индуктор. Всяка от трите фазни намотки се разполага на двойка срещулежащи (с обща ос) полюси. Всеки крайник представлява част от сферична повърхнина, ограничена чрез пресичането си с четири равнини, минаващи през центъра на една сфера. Две от равнините са успоредни на осите на едната двойка полюси, две – на другата. Разбира се, яремът е също сферичен.

Направеното тук разглеждане е само принципно, без да се отчитат на този етап многобройните проблеми, произтичащи главно от това, че машината е затворена отвсякъде. По-важните от тях са:

1. Технологията на полагане на намотката.
2. Видът и технологията за подходящо шихтоване на магнитопровода.
3. Охлаждането.
4. Начинът на зареждане на обработваемия материал.

Целта на изследването е да се обоснове от електромагнитна гледна точка възможността за реализиране на сферична вихрова машина.

## Литература

- Вольдек, А. И. 1966, *Електрически машини*. М., Энергия, 782 с.
- Костов, К. 1987, Многополюсно въртящо се магнитно поле при отсъствие на вторична среда. – *Научна сесия "ВМЕИ "Ленин" '87"*, С.
- Костов, К., К. Тричков 2007, Скаларен магнитен потенциал на една фаза на сферичен индуктор. – Год. МГУ "Св. Иван Рилски", т. 50, св. III, Мех., електр. и автом.