

ЕЛЕМЕНТИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ВИХРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ВЪТРЕШЕН МАГНИТОПРОВОД

Константин Тричков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700-София

РЕЗЮМЕ. Установени са някои зависимости между размерите и електромагнитните параметри на вихров преобразувател с вътрешен магнитопровод. Последните имат важно значение за избора на оптимален вариант за проектирането, при зададен активен обем на работната камера и магнитната индукция.

ELEMENTS OF THE ELECTROMAGNETIC CALCULATION OF A VORTEX CONVERTER WITH AN INNER MAGNETIC CORE

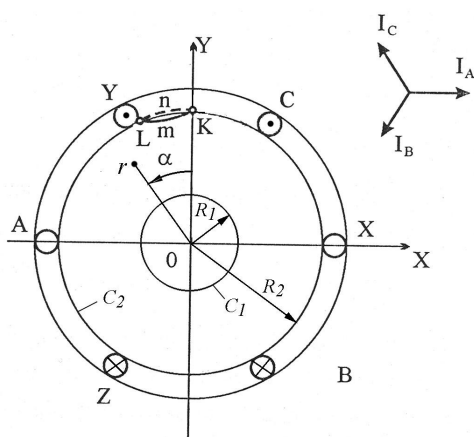
Konstantin Trichkov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700-Sofia

ABSTRACT. Some relationships between the dimensions and the electromagnetic parameters of a vortex converter with an inner magnetic core is established. They are very important to pick out an optimal variant in the design under desired magnetic induction and active volume of the working chamber.

1. Въведение

Преди да се пристъпи към проектиране на вихровите преобразуватели е необходимо да се установят някои зависимости между размерите и електромагнитните й параметри. В процеса на проектирането често се налага да се измени някоя величина и трябва да се знае как това се отразява на останалите. На фиг.1 е показан схематично вихров преобразувател с вътрешен магнитопровод [1].



фиг.1

Стойността на магнитната индукция в активното пространство на работната камера се определя само от изискванията на технологичния процес, за който е предназначена машината. Модулът на основния хармоник на магнитната индукция е инвариант и се определя от израза:

$$B_1 = \frac{\mu\sqrt{2}k_{wt}A}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{R_1}{r}\right)^4 - 2\left(\frac{R_1}{r}\right)^2 \cos 2\alpha} \quad (1)$$

2. Елементи на електромагнитното изчисление

При проектиране на неявнополюсни вихрови преобразуватели с вътрешен магнитопровод [2] (при един и същ брой канали, вид на намотката и еднакво линейно токово натоварване), за да се запази стойността на полето в точките с еднакви относителни радиуси r/R_1 и с еднакви ъглови координати α е необходимо да бъде спазено условието $\frac{R_1}{R_2} = const$. Приемаме, че линейните размери се

изменят така, че индукцията да остане постоянна в стоманата на индуктора. Основно внимание трябва да се обърне на загубите в намотката, защото при вихровата машина, поради необходимостта от голям намагнитващ ток те са значително по-големи от загубите в стоманата. Електрическите загуби в каналната част на намотката са

$$P'_{en} = 2mwr'I^2 = 2mwr\rho \frac{l'}{S'_n} I^2 = 2mwlp \cdot l'j \quad ,$$

където w – брой навивки за един паралелен клон;
 r' – активно съпротивление на каналната част на намотката;
 l' – дължина на каналната част на намотката;

- ρ – специфично съпротивление на материала на проводника;
 j – плътност на тока в проводника;
 $S'_n = n_{en} S_n a$ – еквивалентно сечение на проводника, за пълния ток I ;
 $n_{en} S_n$ – брой и сечение на елементарните проводници.

Специфичното топлинно натоварване на цилиндричната повърхност на индуктора, обусловено от електрическите загуби в намотката е

$$\rho_e = \frac{P'_{en}}{\pi D_2 I} = \frac{2mwI\rho \cdot I'j}{\pi D_2 I} = \rho \cdot jA \quad (2)$$

В последната формула сме взели под внимание, че

$$A = \frac{2mwI}{\pi D_2} \text{ и } \frac{I'}{I} \approx \text{const.}$$

Тъй като $A = \text{const.}$, ρ_e е пропорционално на плътността на тока. От ρ_e зависи прегряването на проводниците. Ето защо, при еднакви изолационни материали се приема, че $j = \text{const.}$ За дадени допустими топлинни натоварвания магнитната индукция определя A и j . Само при много дълги машини и същия начин на охлаждане е необходимо леко да се намали j .

Във вихровата машина $2mwI \equiv D_2$. Същевременно

$$2mwI = 2mw \frac{I}{S'_n} S'_n = 2mwjS'_n = jS_m,$$

където S_m е общото сечение на медта на намотката. Следователно $S_m \equiv D_2$, защото $j = \text{const.}$ При еднакви дебелини на изолацията на проводника и на канала и при еднакъв коефициент на запълване може да се приеме, че и общото сечение на каналите $S_x \equiv D_2$. При увеличаване на диаметъра k пъти, заедно със зъбното деление, поради изискването за постоянство на индукцията, се увеличава k пъти и широчината на зъба. Ако зъбът е с еднаква широчина по височината си, а каналът е трапецовиден, k пъти се увеличава и малката му основа. Тъй като $S_x \equiv D_2$, височината на канала се увеличава по-малко от k пъти, така че при по-голям диаметър той е относително поплитък. В резултат на това, изработването на малки вихрови машини е затруднено, понеже каналите трябва да са прекалено дълбоки. Ако се вземе предвид, че при големите машини централната зона на канала се отдалечава от охлаждащата повърхност, поради което максималното прегряване на намотката се увеличава, става ясно, че при тях все пак трябва малко да се намали j , още повече, че има възможност да се увеличи дълбочината на каналите. Изводът е, че при увеличаване на диаметъра k пъти (при запазване на съотношението $\frac{R_1}{R_2}$), плътността на тока трябва да се намалява незначително, а увеличаването на

височината му да е малко под пропорционалното – $(0,8 \div 0,9)k$ пъти. По-големи отклонения от посочените, поради разликите в специфичното топлинно натоварване на цилиндричната повърхност на индуктора, водят до разлики в средното прегряване на машината.

При увеличаване на диаметъра k пъти, потокът в активния обем се увеличава също k пъти за единица дължина на индуктора. Затова се увеличава k пъти и височината на ярема. Външният диаметър се увеличава по-малко от k пъти, заради по-слабото увеличение на височината на канала.

За да се запази стойността на A , при увеличение на диаметъра k пъти трябва и производението wI да се увеличи k пъти. При други равни условия, реактивните съпротивления са пропорционални на w^2 . Същото се отнася и за активното съпротивление, защото ако обемът на медта е постоянен, за да се увеличи w например n пъти, се намалява сечението на проводника n пъти. Тъй като и дължината на проводника се увеличава n пъти, активното съпротивление се увеличава n^2 пъти. Следователно

$I \equiv \frac{U}{w^2}$, където U е захранващото напрежение. Тогава

$$wI \equiv w \frac{U}{w^2} \equiv \frac{U}{w},$$

т.е. намалението на w не само увеличава тока, но и производението wI . При постоянно U , при нарастване на диаметъра k пъти, за да се увеличи $\frac{U}{w}$ също k пъти, трябва

да се намали броят на навивките k пъти. Всъщност желаното увеличение на wI се постига с малко по-слабо намаление на w , заради понижаването на каналното разсейване (което също повишава тока), дължащо се на намалената относителна дълбочина на каналите. Може да се направи изводът, че при нарастване на диаметъра производението wD_2 леко се увеличава. Намаляването на w при нарастване на диаметъра води до намаляване на активното и на всички реактивни съпротивления, включително и главното. Както видяхме обаче, каналното разсейване се намалява в малко по-голяма степен, поради което се увеличава слабо отношението на е.д.н. към напрежението k_E . Това означава, че при неизменно напрежение основният хармоник на е.д.н. малко нараства. Очевидно, k_E нараства и при увеличаване на дължината на машината, защото делът на индуктивното съпротивление в челното разсейване намалява.

Да разгледаме геометрично подобни вихрови машини (подобие то е нарушено само за височината на зъбите и каналите, която нараства по-бавно). Изчислителната мощност, както при електрическите машини, е $P' = mE_1 I$, защото и тук съществува електромагнитна индукция, а стойностите на основния хармоник на е.д.н. (а не на мрежовото напрежение) и на тока са свързани с всички главни размери и с големината на магнитната индукция в активния обем. Същевременно $E_1 \equiv wB_{cm} S_{cm} j'_n$, а $I = j'_n S'_n$, където B_{cm} е индукцията в едно сечение S_{cm} на стоманата на индуктора. Следователно

$$P' \equiv \omega B_{cm} S_{cm} j s'_n .$$

Тъй като $S_m = \omega s'_n$ е общото сечение на медта на намотката, се получава:

$$P' \equiv B_{cm} j S_{cm} S_m .$$

Както установихме по-горе, $S_m \equiv D_2$, за разлика от обикновените променливотокови машини, където е пропорционално на квадрата на размерите на едно напречно сечение, а значи на D^2 . Затова при $j = const.$, $B_{cm} = const.$ се получава че

$$P' \equiv S_{cm} S_m \equiv D_2 I D_2 \equiv D_2^2 I ,$$

където: I е дължината на индуктора.

Обемът на вихров преобразувател с вътрешен магнитопровод е

$$V = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) l = \frac{\pi}{4} D_2^2 l \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right] = k_\theta I D_2^2 , \quad (3)$$

$$\text{където: } k_\theta = \frac{\pi}{4} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right] = const, \text{ при } \frac{D_1}{D_2} = const .$$

Следователно изчислителната мощност на вихровата машина е пропорционална на активния обем на индуктора, т.е.

$$P' \equiv D_2^2 I \equiv V . \quad (4)$$

Ако се вземе предвид намаляването на относителната дълбочина на каналите, мощността се увеличава малко по-бързо от общия обем и от масата му. По същата причина загубите в стоманата, които са пропорционални на общия обем, нарастват малко по-бавно от мощността. Загубите в медта при постоянна плътност на тока са пропорционални на $S_m I$, т.е. на $D_2 I$. Следователно те нарастват значително по-бавно с увеличението на диаметъра.

Изследване на изменение на магнитната енергия W_μ в активния обем, при изменение на съотношението на радиусите R_1/R_2 .

Магнитната енергия в обем V е

$$W_\mu = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \vec{H} dV \quad (5)$$

За изотропна и хомогенна среда (въздух)

$$W_\mu = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V H^2 dV . \quad (6)$$

След заместване и интегриране по r и α в полярна координатна система получаваме:

$$W_\mu = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{2k_{w1}^2 A^2}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right)^2} I \int_{R_1}^{R_2} r dr \int_0^{2\pi} \left(1 + \frac{R_1^4}{r^4} - 2 \frac{R_1^2}{r^2} \cos 2\alpha\right) d\alpha \quad (7)$$

Окончателно за W_μ получаваме:

$$W_\mu = \mu_0 \pi k_{w1}^2 A^2 I R_2^2 \frac{1 + \frac{R_1^2}{R_2^2}}{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}} \quad (8)$$

Както трябваше да се очаква за $R_1/R_2 = const$ и линейно токово натоварване $A = const$, магнитната енергия е пропорционална на вътрешния обем на индуктора $\pi D_2^2 l$.

Участващият във формулата за W_μ магнитен интензитет е определен при пренебрегване на магнитното съпротивление на магнитопровода на индуктора. При това допускане магнитната енергия е монотонно растяща функция на R_1/R_2 , т.е. на $R_1 < R_2$. Извършеното изследване по метода на крайните елементи с помощта на програма FEMM, отчитаща нелинейното магнитно съпротивление на индуктора показва, че в действителност W_μ има максимум при големи стойности на R_1/R_2 . В таблица 1 са показани резултатите от изследването на магнитна система, състояща се от статор на асинхронна машина АО2 71-2, при поставяне на вътрешен магнитопровод с радиус R_1 .

Таблица 1.

W_μ	J	9,69	10,10	10,59	11,20	11,94	12,83	13,92
R_1	mm	22	26	30	34	38	42	46
R_1/R_2	-	0,244	0,289	0,333	0,378	0,422	0,467	0,511
W_μ	J	41,45	58,75	62,53	62,82	62,59	58,85	27,81
R_1	mm	75	80	81,5	82	82,5	84	88
R_1/R_2	-	0,833	0,889	0,906	0,911	0,917	0,933	0,978

Резултатите показват, че при $R_1/R_2 \approx 0,911$, за даденото линейно токово натоварване $A = 54113$ A/m, магнитната енергия е максимална и технологичният процес би протичал най-интензивно, ако индукторът е достатъчно голям, за да може да се обезпечи достатъчна дебелина R_1-R_2 на работния обем, осигуряваща нормална работа на феромагнитните работни частици. Въпреки това, при такава стойност на R_1/R_2 производителността би спаднала чувствително, поради твърде малкия работен обем. Ето защо не се достига максимумът на W_μ , а се използва областта, в която при нарастване на R_1/R_2 се съсредоточава все по-голяма енергия във все по-малък обем. Може да се изследва експериментално производителността на конкретен технологичен процес, извършван върху конкретен материал при $A=const$, $k_{w1}=const$, $l=const$, $R_2=const$ и $R_1/R_2 = var$.

От получените данни се установява оптималната стойност на съотношението $R_1/R_2 = (R_1/R_2)_{opt}$, при което производителността за даден технологичен процес и обработваем материал е максимална.

3. Изводи

- Установени са някои зависимости между размерите и електромагнитните параметри на неявнополюсен вихров преобразувател с въртящо се магнитно поле. Извършено е минимизиране на загубите и е дефиниран оптималният диапазон на отношението на изчислителната дължина към диаметъра на електромагнитната система.
- С помощта на програмата FEMM, по метода на крайните елементи е изследвано изменението на магнитната енергия в активния обем на електромагнитната система при изменение на съотношението на радиусите R_1/R_2 . Резултатите показват, че при $A=const$, при нарастване на R_1/R_2 се съсредоточава по-голяма магнитна енергия в по-малък обем. Поради тази причина оптималната стойност на отношението R_1/R_2 трябва да се

определя в зависимост от изискванията, предявявани от конкретен технологичен процес.

Литература

- Тричков, К. Б. Магнитно поле на вихрова машина с вътрешен магнитопровод. Сп. "Електротехника и електроника", кн.3-4, С., 2009.
- Тричков, К.Б., К.Н.Костов. Магнитно поле на неявнополюсен електромеханичен преобразувател с въртящо се магнитно поле. Нац.конф. с межд.участие "Автоматизация в минната индустрия и металургията" "БУЛКАМК '08", С., 2008.

*Препоръчана за публикуване от
Редакционен съвет*