

УДК 621.313.12

М.В.ГРЕЧКОГірничий факультет Української інженерно-педагогічної академії
ngretchko@ukr.net**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВЕНТИЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІНДУКТОРНОГО ТИПУ**

For the gate generator of inductor type on the basis of a solution of the field tasks the technique of definition of magnetic parameters represented

Актуальність проблеми. Серед безконтактних генераторів найбільшого поширення на тракторах, які працюють в умовах сильної запорошеності та вібрації, набули генератори індукторного типу через відносно просту конструкцію та надійність в роботі [1]. Але застосування існуючих конструкцій індукторних генераторів на автомобілях обмежується через їх низькі питомі показники [2].

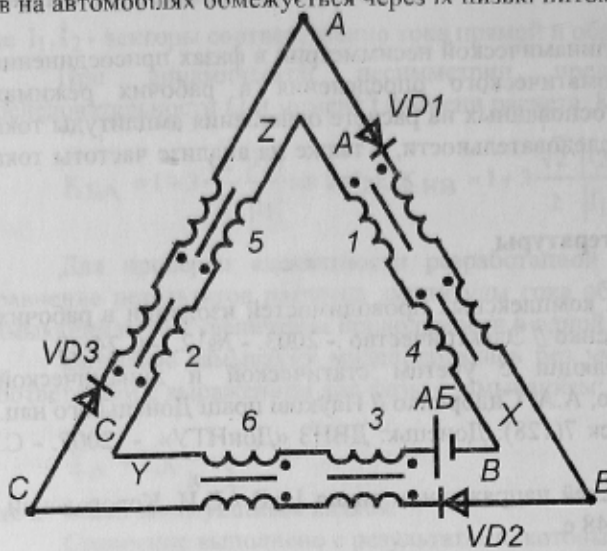


Рисунок 1 – Схема ВГІТ

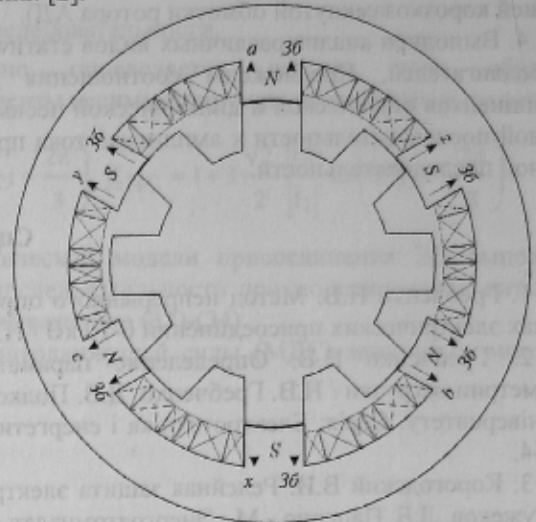


Рисунок 2 – Розрахункова модель ВГІТ

Таблиця 1 – Конструктивні параметри ВГІТ

Число зубців статора	Z_1	6
Число зубців ротора	Z_2	8
Зовнішній діаметр статора, мм	$D_{з1}$	128
Внутрішній діаметр статора, мм	D_1	81
Зовнішній діаметр ротора, мм	$D_{з2}$	80,4
Ширина зубця статора, мм	b_{z1}	15
Висота зубця статора, мм	h_{z1}	10
Ширина зубця ротора, мм	b_{z2}	14,6
Висота зубця ротора, мм	h_{z2}	11,2
Число витків котушки обмотки збудження	$W_{зб}$	52
Число витків котушки якірної обмотки	W_a	52

Для створення математичної моделі такого типу генератора необхідно визначити його електромагнітні параметри.

Мета роботи – розробка методики визначення індуктивних параметрів ВГІТ.

Викладення основного матеріалу. Значення магнітних потоків, розподіл магнітної індукції, індуктивні параметри, електромагнітний момент та інші електромагнітні параметри генератора розрахунковим шляхом в досить точному ступені можуть бути визначені тільки на основі рішення польових задач, причому в умовах конструкції ВГІТ це може бути зроблено тільки чисельними методами [7]. З них було обрано метод кінцевих елементів, який дозволяє досить точно враховувати геометричну структуру ВГІТ і насичення феромагнітних матеріалів. Для цього методу є програмне забезпечення, наприклад, програма FEMM [8], тестування якої довело її високу

ефективність [9]. Хоча ця програма і обмежена розгляданням магнітних полів в поперечному перетині електричної машини складної структури, можна обійтися без використання більш складних програмних продуктів, наприклад, Ansys [10], враховуючи її обмежену доступність і складність підготовки розрахунків.

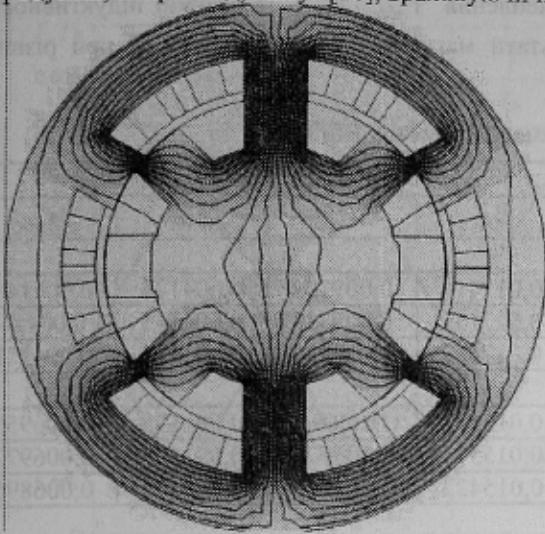


Рисунок 3 – Результат розрахунку магнітного поля генератора при $\alpha = 0$

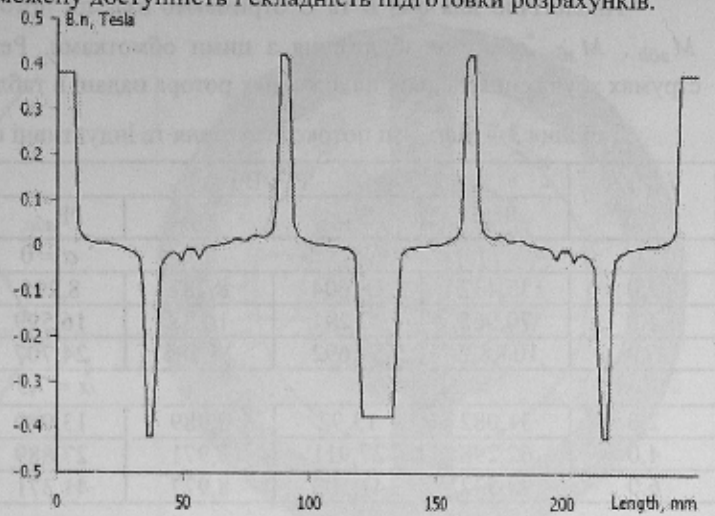


Рисунок 4 – Розподіл радіальної складової магнітної індукції по лінії обводу на рівні зазору

Таблиця 2 – Магнітні індукції у магнітопроводі ВГП при різних значеннях $I_{зб}$ і α

	$I_{зб}, A$	2,0	4,0	6,0
$B, Tл$ при $\alpha = 0$	Зуб статора	0,387	0,767	1,155
	Зуб ротора	0,394	0,795	1,18
	Ярмо статора	0,217	0,44	0,646
	Ярмо ротора	0,25	0,475	0,715
$B, Tл$ при $\alpha = 7,5^\circ$	Зуб статора	0,305	0,65	0,93
	Зуб ротора	0,309	0,62	0,95
	Ярмо статора	0,290	0,578	0,865
	Ярмо ротора	0,29	0,593	0,832
	Загор	0,395	0,792	1,174

Для визначення ролі системи збудження ВГП розрахунок магнітного поля в першу чергу було проведено в режимі холостого ходу, тобто від дії обмотки збудження. Картина магнітного поля збудження при слабкому насиченні магнітопроводу при струмі $I_{зб} = 2 A$ представлена на рис.3. Лінії рівного векторного магнітного потенціалу A проводяться з певним кроком від максимального значення векторного магнітного потенціалу (ВМП) $A_{max} = 0.003018 Bб/м$ по всій області розрахунку. Положення ротора, що наведено на рис.2 і 3, відповідає вихідній позиції ($\alpha = 0$).

Розрахунки магнітного поля при $\alpha = 0$ проводились і при більших значеннях струму обмотки збудження до $I_{зб} = 6 A$. Картина поля залишилась практично без змін, оскільки навіть при такому струмі магнітопровід залишається слабонасиченим, а індукція в зазорі сягає $B_\delta = 1,2 Tл$. Рівні магнітної індукції у різних частинах магнітопроводу наведено в табл.2.

Одним з важливих результатів польових розрахунків є визначення індуктивних параметрів обмоток. Досвід чисельних розрахунків індуктивностей електричної машини представлений в [11]. Результати розрахунку магнітного поля дозволяють безпосередньо через розподіл векторного магнітного потенціалу визначити магнітне потокозчеплення обмотки [12, 13]:

$$\Psi_{зб} = W_{зб} l_a \left(\frac{1}{S_{зб+}} \int_{S_{зб+}} A_{z,зб} dS - \frac{1}{S_{зб-}} \int_{S_{зб-}} A_{z,зб} dS \right), \quad (1)$$

де $A_{z,зб}$ - ВМП поля, збуджений струмом $I_{зб}$ обмотки; $S_{зб+}$, $S_{зб-}$ - площі поперечного перетину сторін котушок обмотки з різним напрямком струму по всіх полюсах; $W_{зб}$ - число витків на полюс.

Перехід від магнітного потокозчеплення до індуктивності обмотки здійснюється за класичною формулою:

$$L_{зб} = \frac{\Psi_{зб}}{I_{зб}}. \quad (2)$$

Аналогічно за формулою (1) для якірної обмотки фази A будемо мати взаємне потокозчеплення:

$$\Psi_{зба} = W_a l_a \left(\frac{1}{S_{a+}} \int_{S_{a+}} A_{z,a} dS - \frac{1}{S_{a-}} \int_{S_{a-}} A_{z,a} dS \right), \quad (3)$$

де W_a - число витків фазної обмотки на полюс.

Аналогічно за формулою (2) взаємна індуктивність обмотки збудження і якірної обмотки фази A

$$M_{zba} = \frac{\Psi_{zba}}{I_{zb}}, \quad (4)$$

Аналогічно для фаз *B* та *C* отримаємо взаємні потокозчеплення Ψ_{zbb} , Ψ_{zbc} та взаємні індуктивності M_{zbb} , M_{zbc} обмотки збудження з цими обмотками. Результати магнітних розрахунків ВГТ при різних струмах збудження та двох положеннях ротора надані в табл. 3.

Таблиця 3 – Магнітні потокозчеплення та індуктивні параметри обмоток ВГТ

I_{zb}, A	$\Psi, мВб$				L та $M, Гн$			
	Ψ_{zb}	Ψ_{zba}	Ψ_{zbb}	Ψ_{zbc}	L_{zb}	M_{zba}	M_{zbb}	M_{zbc}
$\alpha = 0^\circ$								
2,0	35,432	18,604	8,287	8,295	0,017716	0,009302	0,004144	0,004148
4,0	70,965	37,291	16,58	16,599	0,017741	0,009323	0,004145	0,00415
6,0	104,829	54,692	24,685	24,707	0,017472	0,009115	0,004114	0,004118
$\alpha = 7,5^\circ$								
2,0	31,082	13,92	2,989	13,909	0,015541	0,00696	0,001495	0,006955
4,0	62,298	27,911	5,971	27,889	0,015575	0,006978	0,001493	0,006972
6,0	92,532	41,393	8,977	41,371	0,015422	0,006899	0,001496	0,006895

Для явнополосних машин індуктивність залежить від взаємного положення полюсів статора і ротора. Тому розрахунки було проведено при різних положеннях ротора з його послідовними поворотами. Максимальній індуктивності відповідає $\alpha = 0^\circ$, а мінімальній - $\alpha = 7,5^\circ$. Графіки результатів розрахунку індуктивних параметрів обмоток при живленні тільки обмотки збудження в функції кутового положення ротора надані на рис. 5. Період взаємних індуктивностей M_{zba} , M_{zbb} , M_{zbc} становить 45° , а фазовий зсув - 15° . Для власної індуктивності обмотки збудження L_{zb} період виявляється в три рази менше і складає 15° .

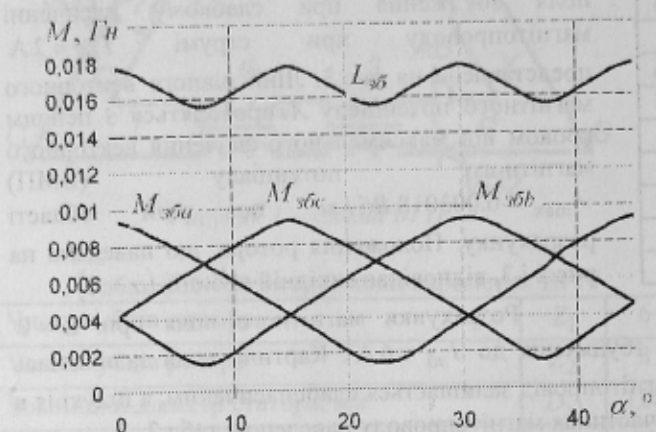


Рисунок 5 – Залежність індуктивних параметрів обмоток від кутового положення ротора при $I_{zb} = 4 A$

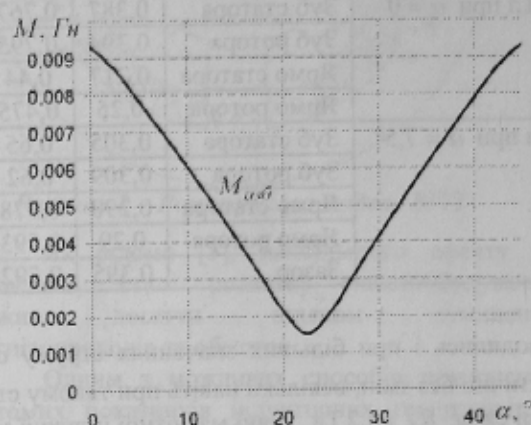


Рисунок 6 – Зміна взаємної індуктивності обмоток якірної фази *a* і збудження при $I_{zb} = 4 A$

Для отримання власних і взаємних індуктивностей якірних обмоток фаз розрахунки магнітного поля проводилися при різних положеннях ротора тільки для однієї з фаз (*a*). З урахуванням симетрії і періодичності розрахунки досить було провести безпосередньо при зміні кута α у межах $0..22,5^\circ$, а потім поширити результати на повний період у межах $0..45^\circ$. На рис. 6 наведено графік тільки взаємної індуктивності якірної обмотки фази *a* з обмоткою збудження - M_{azb} . Для підтвердження правильності розрахунків переконаємось, що $M_{azb} = M_{zba}$. Тому буде достатньо графіків тільки взаємних індуктивностей M_{zba} .

На рис. 7 наведено графіки власних індуктивностей якірних обмоток фаз L_a , L_b , L_c , які ідентичні, але мають фазовий зсув на третину періоду, а період для взаємних індуктивностей становить 45° .

Оскільки індуктивні параметри якірних обмоток фаз є породженням їхніх магнітних полів, то продемонструємо деякі з них для більш чіткого сприйняття представлених результатів. На рис. 8 і 9 надана картина магнітного поля та розподіл радіальної складової магнітної індукції по лінії обводу на рівні зазору якірної обмотки фази *a* при $\alpha = 0^\circ$, коли власне магнітне потокозчеплення і, відповідно, власна індуктивність L_a будуть максимальні. На рис. 10 і 11 надана картина магнітного поля при положенні ротора ($\alpha = 22,5^\circ$), коли власна індуктивність L_a мінімальна.

За представленими на рис. 6 і 7 кутовими залежностями індуктивних параметрів якірних обмоток фаз на рис. 12 побудовані графіки взаємних індуктивностей якірних обмоток фаз M_{ab} та M_{ac} . Очевидно, що характер цих залежностей значно складніше, ніж попередніх, близьких до гармонійних. Ці складні залежності істотно

ускладнили б розрахунки, однак значення M_{ab} та M_{ac} майже на два порядки менше, ніж попередні. Тому в математичній моделі взаємодією якірних обмоток фаз можна знехтувати.

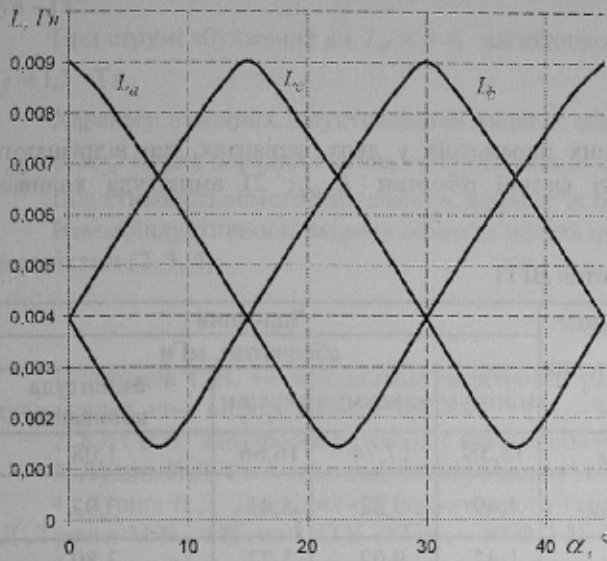


Рисунок 7 – Зміна індуктивностей якірних обмоток фаз при $I_{сб} = 4 \text{ А}$

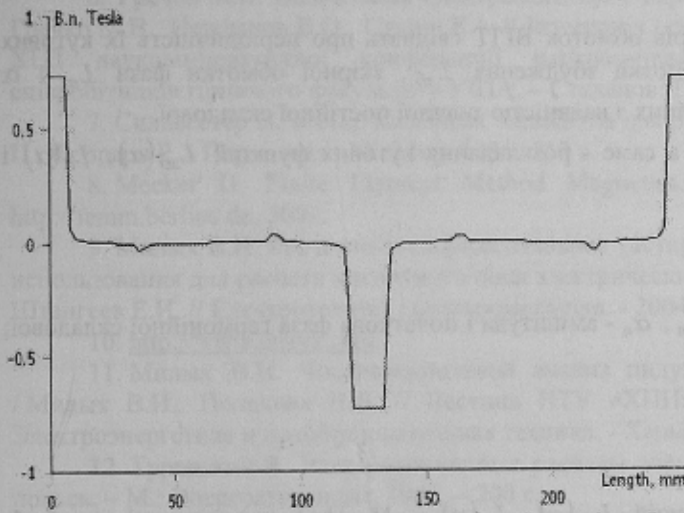


Рисунок 9 – Розподіл радіальної складової магнітної індукції по лінії обводу на рівні зазору при $\alpha = 0$ та струмі фази $I_a = 4 \text{ А}$

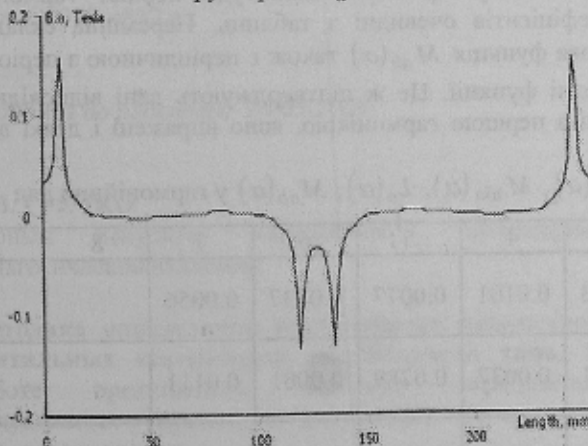


Рисунок 11 – Розподіл радіальної складової магнітної індукції по лінії обводу на рівні зазору при $\alpha = 22,5^\circ$ та струмі фази $I_a = 4 \text{ А}$

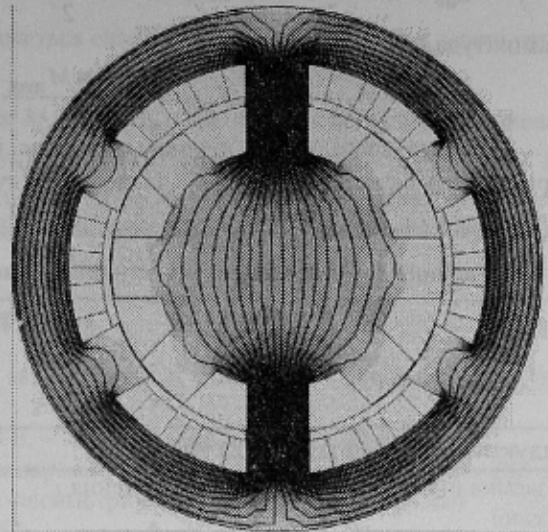


Рисунок 8 – Картина магнітного поля якірної обмотки фази А при $\alpha = 0$ і $I_a = 4 \text{ А}$ ($A_{\text{max}} = 5,82 \text{ мВб/м}$)

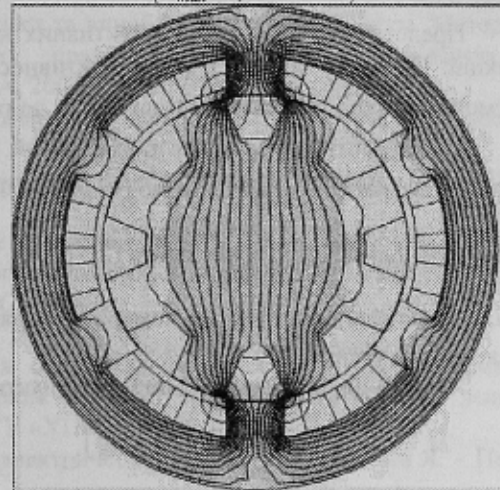


Рисунок 10 – Картина магнітного поля якірної обмотки фази А при $\alpha = 22,5^\circ$ і $I_a = 4 \text{ А}$ ($A_{\text{max}} = 0,972 \text{ мВб/м}$)

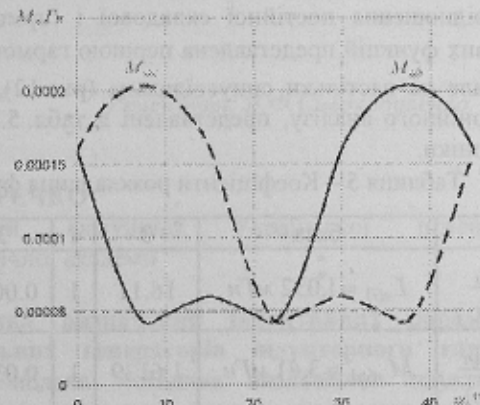


Рисунок 12 – Зміна взаємніндуктивностей фазних обмоток при живленні обмотки фази А струмом $I_a = 4 \text{ А}$

Порівняння мінімальних, максимальних та середніх значень індуктивних параметрів обмоток ВГТТ наведено в табл.4:

$$L_{av} = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2}; \quad M_{av} = \frac{M_{\min} + M_{\max}}{2}$$

і амплітуда коливання:

$$L_m = \frac{L_{\min} - L_{\max}}{2}; \quad M_m = \frac{M_{\min} - M_{\max}}{2}.$$

Представлені також відносні значення індуктивних параметрів у двох варіантах, що відрізняються прийнятою базою: 1) середнє значення індуктивності фазної обмотки L_{av} ; 2) амплітуда коливання індуктивності цієї ж обмотки L_m .

Таблиця 4 – Узагальнені індуктивні параметри обмоток ВГТТ

Параметри	Позначення	Значення			
		абсолютні, мГн			
		мінімум	максимум	середнє	амплітуда коливання
Індуктивність обмотки збудження	$L_{зб}$	15,58	17,74	16,66	1,08
Взаємна індуктивність обмоток збудження і фазної	$M_{зба}$	1,49	9,32	5,41	3,92
Індуктивність якірної обмотки фази	L_a	1,42	9,02	5,22	3,80
Взаємна індуктивність якірних обмоток фаз	M_{ab}	0,043	0,160	0,102	0,059

Представлені дані щодо індуктивних параметрів обмоток ВГТТ свідчать про періодичність їх кутових функцій. Причому для власних індуктивностей обмотки збудження $L_{зб}$, якірної обмотки фази L_a і їх взаємоіндуктивностей $M_{зба}$ вони близькі до гармонійних з наявністю значної постійної складової.

Підтвердити це дозволяє гармонійний аналіз, а саме - розкладання кутових функцій $L_{зб}(\alpha)$, $L_a(\alpha)$ і $M_{зба}(\alpha)$ за класичною методикою [14] в ряд Фур'є:

$$L = L_0 + \sum_{n=1}^N L_{mn} \cos(n\alpha + \alpha_n),$$

де L_0 - постійна складова; n - номер члена ряду; L_{mn} , α_n - амплітуда і початкова фаза гармонійної складової; N - кількість членів ряду.

Аналогічно для функції взаємної індуктивності:

$$M = M_0 + \sum_{n=1}^N M_{mn} \cos(n\alpha + \alpha_n).$$

Дані гармонійного розкладання кутових функцій $L_{зб}(\alpha)$, $L_a(\alpha)$ і $M_{зба}(\alpha)$ представлені в табл.5. Нагадаємо, що функція $L_{зб}(\alpha)$ має період 15° (рис.5), інші функції - 45° . Коефіцієнти складової ряду представлені у відносних одиницях (в.о.), причому за базу прийнята амплітуда першої гармоніки. Співвідношення постійної складової і гармонійних коефіцієнтів очевидні з таблиць. Перемінна складова кутових функцій представлена першою гармонікою. Кутова функція $M_{ab}(\alpha)$ також є періодичною з періодом 45° , але не настільки синусоїдальна (рис.12), як попередні функції. Це ж підтверджують дані відповідного гармонійного аналізу, представлені в табл. 5. Тут, поряд з першою гармонікою, явно виражені і деякі вищі гармоніки.

Таблиця 5 – Коефіцієнти розкладання функцій $L_{зб}(\alpha)$, $M_{зба}(\alpha)$, $L_a(\alpha)$, $M_{ab}(\alpha)$ у гармонійний ряд

n	база	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{L_{збn}}{L_{зб1}}$	$L_{зб1} = 1,032 \text{ мГн}$	16.11	1	0.0005	0.0483	0.0101	0.0077	0.0137	0.0056		
$\frac{M_{збан}}{M_{зба1}}$	$M_{зба1} = 3,41 \text{ мГн}$	1.6139	1	0.0336	0.1011	0.0037	0.0289	0.0001	0.0111		
$\frac{L_{an}}{L_{a1}}$	$L_{a1} = 3,323 \text{ мГн}$	1.5946	1	0.0257	0.0963	0.0012	0.0288	0.0013	0.0135	0.0018	0.0100
$\frac{M_{abn}}{M_{ab1}}$	$M_{ab1} = 0,084 \text{ мГн}$	1.3290	1	0.2491	0.1698	0.0137	0.0264	0.0035	0.0103	0.0045	0.0211

Висновки та рекомендації. Для ВГІТ можна визначити індуктивні параметри тільки на основі рішення польових задач виключно чисельними методами.

Для конструктивних даних табл. 1 індуктивність обмотки збудження 15° , інші функції - 45° , а їх фазовий зсув - 15° .

При струмі збудження до $I_{\delta} = 6$ А магнітопровід залишається слабонасиченим, а індукція в зазорі сягає $B_{\delta} = 1,2$ Тл.

Характер взаємних індуктивностей якірних обмоток фаз M_{ab} та M_{ac} досить складний, однак значення M_{ab} та M_{ac} на два порядки менше, тому взаємодію якірних обмоток фаз можна знехтувати.

Індуктивності обмоток збудження, якірних та їх взаємоіндуктивності носять синусоїдальний характер.

Взаємоіндуктивності якірних обмоток носять несинусоїдальний характер з явно вираженими вищими гармоніками (2, 3, 4).

Список літератури

1. Акимов С.В. Бесконтактные электрогенераторы на автомобилях и тракторах. / Акимов С.В. - М.: Научно-исслед. ин-т инфор. и автом. пром-ти, 1974. - 48 с.
2. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. / Ютт В.Е. - М.: Транспорт, 1989. - 287 с.
3. Лущик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты. / Лущик В.Д. - К. Техніка, 1993.- 203 с.
4. Лущик В.Д. Дослідження індукторного генератора з несиметричною суміщеною обмоткою / Лущик В.Д., Гречко М.В. // Вісник НТУ «ХПИ». - 2002. - № 4. - с. 49-52.
5. Гречко М.В. Аналіз конструктивних та схемних рішень генераторів індукторного типу. / Гречко М.В., Дяченко В.В. // Збірник наукових праць. - Миколаїв: НУК, 2005. - ч. 2. - С.135-142.
6. Гречко М.В. Визначення електромагнітних параметрів вентильного генератору індукторного типу. / Гречко М.В., Нежданов В.О., Ступін К.І. // Інтеграція освіти, науки та виробництва у XXI столітті. Матеріали ХІІІ науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників гірничого факультету УПА. - Стаханов: ГФ УПА, 2009. - С. 107-111.
7. Сильвестер П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. / Сильвестер П., Феррари Р. - Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.-318 с.
8. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
9. Мильх В.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин. / Мильх В.И., Поляков И.В., Полякова Н.В., Штангеев Е.И. // Електротехніка і електромеханіка. - 2004.-№3.- С. 38- 43.
10. <http://www.ansys.com>.
11. Мильх В.И. Численно-полевой анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора. / Мильх В.И., Полякова Н.В. // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2005. - №36.- С.39-46.
12. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин / Туровский Я. - Пер. с польск. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 200 с.
13. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. / Домбровский В.В. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. - 256 с.
14. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Корн Г., Корн Т. М.: Наука, 1973.- 832 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2009

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

Н.В. ГРЕЧКО

Гірничий факультет Української інженерно-педагогічної академії

Методика определения индуктивных параметров вентильных генераторов индукторного типа. В работе представлена методика определения индуктивных параметров вентильных генераторов индукторного типа.

Методика, определение, индуктивные параметры, вентильный генератор, индукторный тип

М.В. ГРЕЧКО

Гірничий факультет Української інженерно-педагогічної академії

Методика визначення індуктивних параметрів вентильних генераторів індукторного типу. В роботі подана методика визначення індуктивних параметрів вентильних генераторів індукторного типу.

Методика, визначення, індуктивні параметри, Вентильний генератор, індукторний тип