

УДК.621.313

ТИТКО О.І., чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

КОБЗАР К.О., гол. конструктор з ТГ

ДП завод "Електроважмаш", м. Харків



ТИТКО О.І.



КОБЗАР К.О.

РОЗРАХУНКОВІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНІВ ЗУБЧАТО-ПАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СТАТОРІВ ТУРБО- І ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

На основі математичного і фізичного моделювання проведено наукове обґрунтування ефективності екранів статора потужних турбо- і гідрогенераторів зубчато-пазової конструкції, застосування яких зменшить в декілька раз максимальну температуру крайніх пакетів осердя статора.

Ключові слова: математичне і фізичне моделювання, експериментальні дослідження, зубчато-пазова конструкція екранів, ефективність екранів, індуктивні датчики поля, механічна стійкість осердя статора, генератор.

Досвід експлуатації потужних генераторів виявив проблему підвищеного нагріву крайніх пакетів статора. Якщо для багатополосних гідрогенераторів проблема нагріву крайніх пакетів статора не є досить актуальною, то в перспективі в генераторах потужністю 800 МВт і вище така проблема може бути уже нагальною.

Для захисту крайніх пакетів осердя статора потужних турбо- і гідрогенераторів від полів розсіяння в кінцевій зоні застосовують цілу низку електропровідних екранів різноманітної конструкції [1, 2]. Але всім їм властиві наступні недоліки. Вони не захищають або неефективно захищають зубцеву зону крайніх пакетів. Щоб зменшити нагрів крайніх пакетів в зубцевій зоні застосовують скошення сегментів, для потужних генераторів – дуже глибоке скошення, що значно ослабляє механічну міцність статора.

Тому слід звернутись до ідеї застосування екранів зубчато-пазової конфігурації [3], які б наби-

ралися, як і залізо статора, з окремих сегментів і повторювали геометрію сегментів заліза. Така конструкція екрана буде ефективно захищати також і зубцеву зону крайніх пакетів. В зв'язку з шихтовкою в аксіальному напрямку такий екран не буде нагріватись від радіального магнітного потоку в зазорі машини.

Для забезпечення механічної міцності такий екран може бути виконано багат шаровим з чергуванням сталевих та мідних сегментів [4].

Така конструкція є досить простою за технологію виготовлення та дозволяє відмовитися від скошення крайніх пакетів, які в такому випадку є просто магнітним шунтом. Проте для застосування таких конструкцій виникає низка проблем, які треба вирішити. Адже сегменти не можуть бути розташовані на торцевій поверхні статора, так як це може призвести до їх руйнування при розпушуванні. Значення електродинамічних зусиль в мідних сегментах будуть значно вищі, ніж в сталевих. Але якщо мідні сегменти розташувати всередині пакетів, чи буде ефективним таке екра-

Таблиця 1.

№ датчика	Вихідний варіант без екрана	Шести зубцевий екран, товщиною 0,5 мм, вимірювальна планка під екраном	Тризубцевий екран, товщиною 1,5 мм		Тризубцевий екран, товщ. 2 мм	Тризубцевий екран, товщиною 3,5 мм	
			Вимірюв. планка під екраном	Вимірюв. планка над екраном	Вимірюв. планка над екраном	Вимірюв. планка під екраном	Вимірюв. планка над екраном
1	2	3	4	5	6	7	8
1	18,5	16,2	14,6	14,6	13	11	15,7
2	9,4	8,4	8,1	7,3	6	5,7	7,3
3	11,8	9,3	7,5	8,1	6	6	8,0



нування? Ці та інші аспекти екранування осердя статора ТГ зубчато-пазовими конструкціями досліджуються в даній роботі.

Для дослідження ефективності таких екранів на фізичній моделі кінцевої зони генератора [5] було виготовлено низку тризубцевих та шестизубцевих мідних сегментів різної товщини: 0,5 мм; 1,5 мм; 2 мм.

Для вимірювання вихрових струмів в екранах їх було оснащено потенціальними зондами з базою в 10 мм і 20 мм.

Для вимірювання індукції магнітного поля було виготовлено планку з індуктивними датчиками поля, яка не дозволяє при пресуванні осердя пошкодити датчики.

Спочатку випробування моделі проводилося для варіанта, коли окремі мідні сегменти встановлювалися на поверхні крайніх листів осердя статора. В Табл. 1 приведено дані вимірювання для сегментів різної товщини для трьох перетинів зубця в радіальному напрямку (Рис. 1.) Основну увагу при дослідженнях приділено зубцевій зоні статора. Експерименти проводились при частоті $f = 470$ Гц.

При аналізі даних експериментів треба мати на увазі відповідність товщини мідних сегментів для моделі ($f = 470$ Гц) і генератора ($f = 50$ Гц). Виходячи з еквівалентної глибини проникнення магнітного поля екран в експериментах товщиною 0,5 мм адекватен за даним критерієм екрану ТГ товщиною 1,5 мм. Аналогічно екрану товщиною 1,5 мм адекватні екрани ТГ товщиною 4,7 мм; 2 мм – 6,3 мм; 3,5 мм – 11 мм.

Аналіз показує, що ефективність електромагнітного екранування такими сегментами є досить висока. Для допустимих товщин екрана (в генераторах застосовуються екрани товщиною 10 мм) можна добитись зменшення аксіальної складової індукції магнітного поля в крайніх пакетах осердя статора в 1,7 – 2 рази. А це значить, що питомі витрати зменшуються в 2,5 – 4 рази. Причому, зі збільшенням радіусу екрануюча дія зростає і це принципово вирішує проблему нагрівання крайніх пакетів осердя статора і їх зубцевих зон. Треба мати на увазі, що в радіальному напрямку величина B_z з ростом радіуса зменшується. Так, в експериментах в т. 1 значення B_z в 3÷3,5 разів більше за значення B_z в т. 3.

На Рис. 2, 3 приведено графіки залежності аксіальної індукції магнітного поля в кінцевій зоні фізичної моделі ТГ від різних факторів при застосуванні екранів зубчато-пазової конструкції. Треба відмітити, що отримані експериментальні дані є середньостатистичними, так як вони залежать від різних факторів, в т. ч. від зусиль затягу

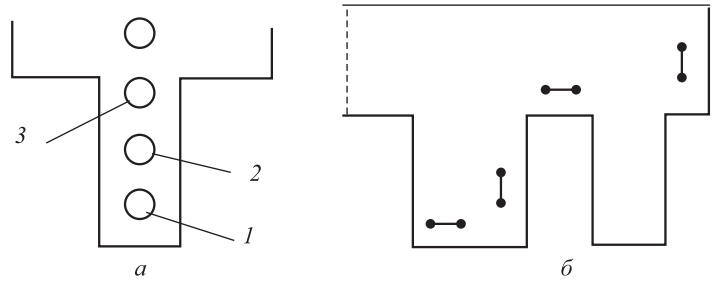


Рис. 1. Схема оснащення:

а – спеціальної текстолітової планки датчиками магнітного поля;
б – мідного сегменту потенціальними зондами.

шихтованого магнітопроводу при розбиранні та збиранні моделі для дослідження чергового варіанту, деформації листів заліза статора, яка змінюється від варіанту до варіанту, ідентичного розміщення вимірювальних планок щодо зразків екранів та т. ін.

В процесі експериментів вказані фактори, які впливають на точність і повторення результатів експериментів при переході від одного варіанту до другого, було враховано, в т.ч. шляхом декількох повторень одного і того варіанту екранування. Відмінності складали до 8 %.

Із кривих на Рис. 2 можна зробити висновок, що незамкнені екрани типу зубчато-пазової конструкції екранують неоднаково різні області зубцевої зони. Залежність коефіцієнта екранування

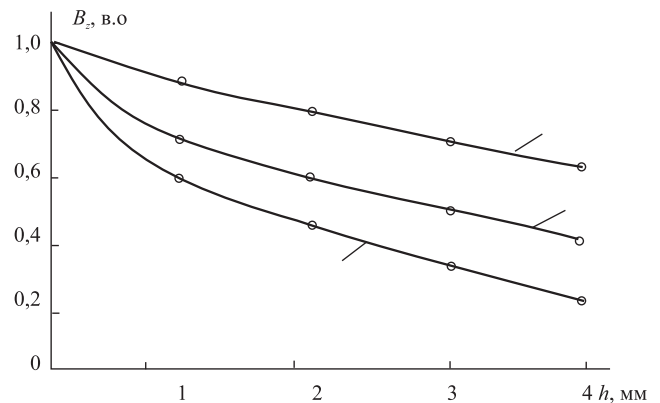


Рис. 2. Залежність магнітної індукції B_z (в.о.) від товщини екрана
1 – в точці 1; 2 – в точці 2; 3 – в точці 3.

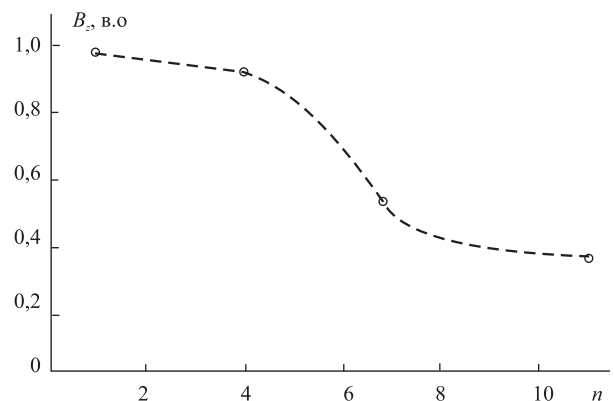


Рис. 3. Розподіл аксіальної складової індукції поля B_z по глибині масиву шихтованого заліза статора, n – номер листа, на якому вимірювалась індукція.

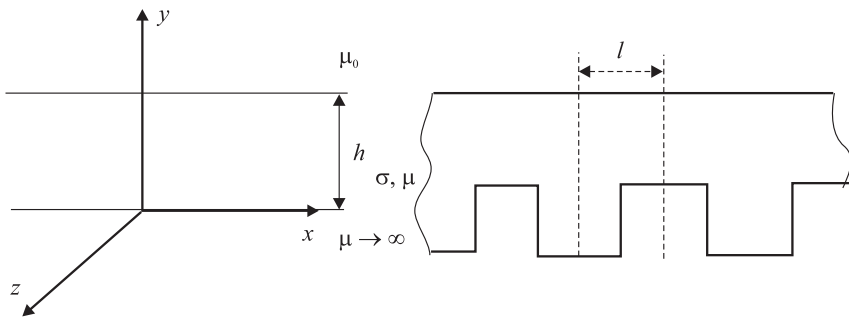


Рис. 4.

від товщини в цьому випадку визначається не експоненціальним законом, що було б у випадку плоско паралельного поля. Криві цих залежностей більш плавно опускаються при збільшенні величини h . Представляє інтерес розподіл аксіальної складової індукції магнітного поля по глибині заліза статора (Рис. 3). Для фізичної моделі в 4–5 крайніх листах магнітна індукція в зубцевій зоні майже не змінюється. Це визначається перш за все геометрією листів статора. Така залежність дає можливість екрани зубчато-пазової конструкції розташовувати в масиві крайніх пакетів ТГ, що зміцнить механічну стійкість крайніх пакетів з екранами. Проведемо дослідження впливу місця розташування екранів в середині листів статора на їх екрануючу здатність.

Для цього розглянемо такі математичні моделі електромагнітних процесів в електропровідному екрані зубчато-пазової конструкції для дослідження на фізичній моделі варіантів (Рис. 4).

Над екраном знаходиться шар бігучої густини лінійного струму, який збуджує поле, що наближено моделює лобові частини обмоток машини.

Не враховується скінченність області розміщення екрана в радіальному напрямку. Модель в такій постанові дозволяє дослідити коефіцієнти затухання характеристик поля у середині масиву осердя статора при застосуванні електропровідних екранів різної товщини. В цьому мають місце дві складові магнітної індукції (B_x, B_y) та одна складова напруженості електромагнітного поля (E_z).

В області зубцевої зони характеристики поля, наприклад, для H_y , представимо у вигляді

$$H_y(x, y, t) = \sum_{n=0}^{\infty} [\dot{H}_{1,yn}(y) \sin \frac{n\pi}{l} x + \dot{H}_{2,yn}(y) \cos \frac{n\pi}{l} x] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}, \quad (1)$$

де τ – полюсне ділення обмотки статора; l – половина зубцевого ділення (Рис. 4).

Таке представлення визначається зубчато-пазовою конструкцією сегментів заліза і екранів статора, які досліджуються. Як відомо, рівняння для характеристик магнітного поля буде наступним

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}_y}{\partial y^2} - j\omega\mu\sigma\dot{H}_y = 0, \quad (2)$$

де μ, σ – магнітна проникність і питомі електропровідність матеріалу екрана.

Підставляючи вираз (1) в рівняння (2) отримаємо коефіцієнт, який визначає затухання поля по товщині екрана (вздовж координати y) запишеться у вигляді

$$\gamma_n = \sqrt{\gamma_{0n}^2 + j\omega\mu\sigma}, \quad (3)$$

$$\text{де } \gamma_{0n}^2 = \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2.$$

Вираз (3) знайдено при такій умові

$$\left| \frac{n\pi}{l} \cdot \frac{\pi}{\tau} / \gamma_n^2 \right| \ll 1, \quad (4)$$

що має місце для фізичної моделі ТГ.

Амплітудні значення для величини H_y рівняння (1) можна представити у вигляді

$$\dot{H}_{kyn} = C_{1n}^k \text{ch } \gamma_n y + C_{2n}^k \text{sh } \gamma_n y, \quad (5)$$

Складові H_x знаходяться з рівняння

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

В діелектричному середовищі (над екраном) вирази для загального розв'язку мають аналогічний вигляд при врахуванні того, що $\sigma = 0$. Постійні інтегрування знаходяться з умов, що на лінійному шарі струму тангенціальна складова зазнає стрибок на лінійну густину струму A_n , на межі двох середовищ виконується рівність тангенціальних складових напруженості та нормальних складових індукції магнітного поля. Феромагнітний масив осердя статора, на якому розміщується екран, має в сотні раз вищу магнітну проникність, ніж проникність мідного екрана. Тому наближено тут можна задати $H_x = 0$.

За таких умов для одношарового екрана вираз (5) буде мати вигляд

$$\dot{H}_{kyn} = \frac{H_n \text{ch } \gamma_n y}{\text{ch } \gamma_n h + \frac{\gamma_n}{\gamma_{0n}} \text{sh } \gamma_n h}, \quad (7)$$

де H_n – постійна величина, в яку не входять характеристики матеріалів та розмір екрана, h – товщина екрана.

Оцінимо деякі закономірності електромагнітних процесів для екрана, товщиною 1,5 мм



для фізичної моделі. Дані для розрахунку:

$$\omega = 470,6,28 = 2952 \text{ с}^{-1}; h = 0,0015 \text{ м}; \\ \mu = 0,1256 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}; \sigma = 0,6 \cdot 10^8 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}; \tau = 0,72 \text{ м}.$$

При 48 зубців в статорі моделі $l = 0,013 \text{ м}$ на радіусі розточки статора. Величина $\gamma_{01} = 241,1 \text{ 1/м}$. Видно, що умова (4) виконується.

Проведемо чисельний аналіз для $n = 1$. Співвідношення величин B_y над і під екраном визначається величиною $k_1 = ch\gamma_1 h$, а коефіцієнт екранування можна визначити величиною

$$k = \frac{ch\gamma_1 h + \frac{1}{\gamma_{01}} sh\gamma_1 h}{ch\gamma_{01} h + sh\gamma_{01} h}, \quad (8)$$

яка характеризує зміну нормальної складової індукції магнітного поля в зоні зовнішньої поверхні екрана з ним і без нього. Отже, для мідного екрана товщиною 1,5 мм $k_1 = 1,12$, $k = 1,32$.

Із порівняння з експериментальними даними видно, що отримані оціночні розрахункові значення ефективності екранів такої конфігурації в зубцевій зоні узгоджуються з результатами експериментів. Для даних товщин екрана і частоти поля вимірювані величини нормальної складової магнітної індукції над і під екраном відрізняються всього на декілька відсотків, що і спостерігалось при експерименті. Треба відмітити, що коли не враховувати зубчато-пазовий розподіл поля, то характеристики поля задавати в тангенціальному напрямку як $e^{j(\omega t - (\pi/\tau)x)}$, то отримуємо абсолютно невірні результати. Коефіцієнт k при цьому досягає значення 40, що, очевидно, не відповідає дійсності. Для кожного перетину зубців в радіальному напрямку l змінюється, а саме збільшується зі збільшенням радіусу. А значить γ_0 зменшується і збільшується екрануюча дія, що і спостерігається в експерименті. Отже отримана методика може бути застосована для оцінки ефективності екранів зубчато-пазової конструкції у ТГ на етапі їх проектування і вибору основних параметрів.

Для оцінки оптимального місця установки електропровідного екрана в крайніх пакетах осердя статора, а саме визначення відстані від екрана до торця осердя, розглянемо таку спрощену математичну модель.

Нехай мають місце три області, де визначається електромагнітне поле, збуджене бігучим струмом в нескінченному тонкому шарі, який розташований в площині $y = 0$ (Рис. 5) і має лінійну гутину $A_0 e^{j(\omega t - (\pi/\tau)x)}$.

Область I – повітряне середовище, де знаходиться шар лінійного струму; область II – шихтовані сегменти заліза осердя статора; область III

– шихтовані сегменти електропровідного екрана.

Знову ж у цьому випадку вектор індукції магнітного поля має дві складові B_x і B_y , а вектор напруженості електричного поля одну E_z . Так як розглядається зубчато-пазова конструкція сегментів осердя статора, то магнітну проникність μ – тензор задаємо як

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{vmatrix}, \quad (9)$$

Тоді необхідно знаходити розв'язок такого рівняння для E_z

$$\frac{\mu_x}{\mu_y} \frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial y^2} - j\omega\sigma\mu_x \dot{E}_z = 0, \quad (10)$$

Характеристики магнітного поля знаходяться із таких співвідношень:

$$\dot{H}_x = -\frac{1}{j\omega\mu_x} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial y}, \quad \dot{H}_y = -\frac{1}{j\omega\mu_y} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x}. \quad (11)$$

При цьому виконується умова:

$$H_x^+(y=0) - H_x^-(y=0) = A_0; \\ B^+(y=0) = B^-(y=0) \quad (12)$$

Граничні умови в цьому випадку:

$$B_{x,y}(y \rightarrow \infty) \rightarrow 0, \\ H_x^+(y=0) - H_x^-(y=0) = A_0; \\ B_y^+(y=0) = B_y^-(y=0) \\ H_x^+ = H_x^-, B_y^+ = B_y^- \text{ при } y = -h_1, \\ H_x(y = -h_1 - h_2) = 0. \quad (13)$$

Остання умова відображає той факт, що сегменти заліза, які розташовані за електропровідним екраном, мають магнітну проникність, значно більшу за магнітну проникність матеріалу екрана.

Приведемо остаточні вирази для розв'язку крайової задачі (10) – (13).

Для області I

$$\dot{H}_y = C_1 e^{-\pi/\tau y} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}, \quad \dot{H}_x = jC_1 e^{-\pi/\tau y} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}. \quad (14)$$

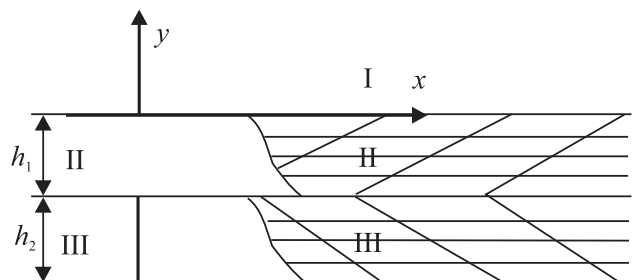


Рис. 5.

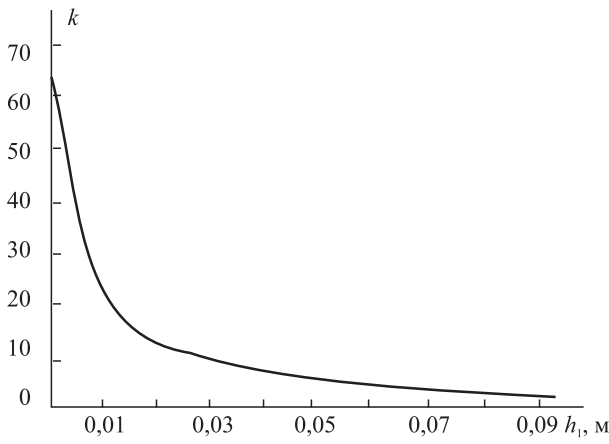


Рис. 6.

Для області II

$$\begin{aligned} \dot{H}_y &= C_2 \operatorname{ch} \gamma_1 y + D_2 \operatorname{sh} \gamma_1 (y), \\ \dot{H}_x &= \frac{\gamma_1}{j \pi} \left(\frac{\mu_y}{\mu_x} \right) [C_2 \operatorname{sh} \gamma_1 y + D_2 \operatorname{ch} \gamma_1 (y)]. \end{aligned} \quad (15)$$

Для області III

$$\begin{aligned} \dot{H}_y &= D_3 \operatorname{ch} \gamma_2 (y + h_1 + h_2), \\ \dot{H}_x &= \frac{\gamma_2}{j \pi / \tau} D_3 \operatorname{sh} \gamma_2 (y + h_1 + h_2). \end{aligned} \quad (16)$$

У виразах (14) – (16)

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 \frac{\mu_x}{\mu_y} + j \omega \mu_x \sigma_1}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 + j \omega \mu_2 \sigma_2} \\ C_1 &= C_2 \frac{\mu_y}{\mu_0}; \quad C_2 = -j A_0 \frac{\mu_0}{\mu_y} - \frac{\gamma_1}{\pi / \tau} \frac{\mu_0}{\mu_x}; \quad D_2 \end{aligned} \quad (17)$$

Задовольняючи умовам при $y = -h_1 - h_2$, вирази для постійних інтегрування будуть такими:

$$D_2 = \frac{B_0 B_3 + D_0 B_2}{\Delta}, \quad D_3 = \frac{A_2 D_0 - B_0 A_3}{\Delta}, \quad (18)$$

де $\Delta = A_2 B_3 + A_3 B_2$, $D_0 = -A_0 j \frac{\mu_0}{\mu_2} \operatorname{ch} \gamma_1 h_1$

$$\begin{aligned} B_0 &= -j \frac{\gamma_1 A_0}{\gamma_2} \operatorname{sh} \gamma_1 h_1 \frac{\mu_0}{\mu_x}, \\ A_2 &= \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{\mu_y}{\mu_x} \left[\operatorname{ch} \gamma_1 h_1 + \frac{\gamma_1}{(\pi / \tau)} \frac{\mu_0}{\mu_x} \operatorname{sh} \gamma_1 h_1 \right] \\ A_3 &= \operatorname{sh} \gamma_1 h_1 + \operatorname{ch} \gamma_1 h_1 \frac{\mu_0}{\mu_x} \frac{\mu_y}{\mu_2} \frac{\gamma_1 \tau}{\pi}, \\ B_2 &= \operatorname{sh} \gamma_2 h_2, \quad B_3 = \operatorname{ch} \gamma_2 h_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Величини σ_1, μ_1 – характеристики заліза осердя статора; σ_2, μ_2 – характеристики електропровідного екрана.

Величини μ_x, μ_y знаходяться для системи зубець—паз таким чином [2]

$$\mu_x = \frac{\mu_0 \mu_1 (h_{II} + h_z)}{(h_z \mu_0 + h_{II} \mu_1)}, \quad \mu_y = \frac{1}{h_z + h_{II}} (h_{II} \mu_0 + h_z \mu_z)$$

де h_2, h_{II} – поперечні розрізи зубця і паза.

На різних висотах паза h_z змінюється, збільшуючись до дна паза.

Для зубцевої зони в зв'язку з тим, що струм на одній стороні зубця тече в одному напрямку, а на другій – в протилежному, уточнення для σ_1, σ_2 проводились на основі того, в якій мірі збільшується опір струму по відношенню до випадку, якби він протікав лише в одному напрямку, як це закладено в моделі. Розподіл густини струму по ширині зубця задавався у вигляді кубічної функції.

Розрахунки проводились при таких вихідних даних: $\tau = 2$ м; $\mu_1 = 50 \mu_0$; $\sigma_1 = 0,2 \cdot 10^7$ 1/Ом·м; $\mu_2 = \mu_0$; $\sigma_2 = 0,6 \cdot 10^8$ 1/Ом·м; $h_{паза} = 0,024$ м; $h_{зубця} = 0,03$ м; $\mu_0 = 0,1256 \cdot 10^{-5}$; $h_2 = 0,01$ м.

Ці дані відповідають генераторам потужністю 200 МВт типу ТГВ-200.

Величини σ_1, σ_2 зменшують свої значення приблизно в 2–3 рази для різних відстаней від коронок зубців, в зв'язку з тим, що зубець має скінченні розміри. Розрахунки проводились для області коронок зубців, величина $\sigma_2 = 0,26 \cdot 10^8$ 1/Ом·м.

Для оцінки місця розташування електропровідного матеріалу значення h_1 варіювалися від нуля до 0,5 м. Треба мати на увазі, що B_y в даній моделі відповідає аксіальній складовій індукції магнітного поля в кінцевій зоні ТГ.

Якщо наближати екран до джерела магнітного поля (шар лінійного струму), то B_y суттєво знижується по всій області, і, навпаки, при наближенні магнітного середовища величина B_y зростає.

Проведено аналіз залежності індукції магнітного поля на зовнішній поверхні сегментів сталі статора при варіації місця розташування екрана всередині пакета, тобто при варіації товщини пакета сегментів сталі статора, за яким розміщується екран. Ефективність екранування визначалось за значенням коефіцієнта екранування k , який визначається як відношення B_y без екрана до B_y з екраном на зовнішній поверхні сегментів сталі при $y = 0$ (Рис. 4) для різних місць розташування екрана.



Треба відзначити, що коефіцієнт k відстані $h_1 = 0,07 \div 0,1$ м від торцевої частини уже наближається до одиниці, так як залізо сталі екранує зустрічний магнітний потік, наведений в електропровідному шарі. Найвища ефективність екрана, коли його встановлено, в даному випадку, на віддалі 0,02 м і ближче до торця осердя статора. Це видно із кривої на Рис. 6. Отже можна вибрати оптимальне значення h_1 при умові максимального значення коефіцієнта екранування і максимальній механічній міцності пакета сегментів сталі, який затискає сегменти екрана.

Висновки.

Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних показує, що отримана методика розрахунку екрануючої дії зубчато-пазової конструкції задовольняє необхідну точність, є досить простою для виконання варіантних розрахунків та оптимізації конструкції таких екранів, в тому числі для потужних турбогенераторів, що проектуються.

На основі проведених експериментів на фізичній моделі ТГ можна зробити висновок, що електропровідні екрани, які повторюють гео-

метрію сегментів заліза статора, ефективно захищають і зубцеву зону, і спинку осердя статора від полів розсіяння, а їх застосування суттєво підвищить механічну стійкість крайніх пакетів за рахунок відмови від виконання скошення і розташування екранів в середині заліза статора.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / Исследования и расчеты / Отв. редакторы Постников И.М., Станиславский Л.Я.* – Киев: Наук. думка, 1971.
2. *Титко А.И.* Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах./Киев: Наук. думка, 1994. – 300 с.
3. *Патент* Англии № 1.091.202. кл. Н 2 А, 1963.
4. *А.с. 1617535 СССР* Сердечник статора электрической машины переменного тока/Титко А.А. (СССР). – № 4416324; заявл. 3.03.1988.
5. *Домбровский В.В.* К расчету насыщенного значения неактивного рассеяния зубцового корня / Турбо- и гидрогенераторы. – Л. – 1974. – С. 26 – 32.

© Титко О.І., Кобзар К.О., 2015

