

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕШІТЧАСТИХ ЕКРАНІВ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.І. Титко¹, чл.-кор. НАН України, **В.І. Смородін**², докт. техн. наук, **В.А. Крамарський**³, канд. техн. наук, **О.П. Грубой**⁴, гол. конструктор, **І.Я. Черемісов**⁵, канд. техн. наук

1–3 – Ін-т електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

4, 5 – завод «Електроважмаш»,

Харків, Україна

Представлено результати досліджень ефективності решітчастих екранів, які захищають від полів розсіяння зубці торцевої зони осердя статора турбогенераторів, а також результати розрахунків втрат в окремих елементах таких екранів для генераторів потужністю 160...200 МВт. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: масштабна фізична модель, турбогенератор, екрани статора, натискні пальці, короткозамикаючі кільця, магнітна індукція, втрати, температура.

Умови експлуатації та вимоги до ефективності функціонування генеруючого обладнання обумовлюють пошук нетрадиційних типів потужних генераторів: з повітряним охолодженням, асинхронних і асинхронізованих, високоманеврених та ін. Для таких типів генераторів знову постає проблема зменшення втрат і рівня нагрівання в кінцевій зоні статора, які обумовлені полями розсіяння. Існуючі засоби екранування полів розсіяння мають такий недолік: вони не захищають зубцеву зону крайніх пакетів. Найбільш ефективним з тих, що застосовуються в турбогенераторах, є екран [5], який встановлено за натисною плитою і загнутий у бік лобових частин обмотки статора. У цій роботі наведено результати розрахункових і експериментальних досліджень ефективності решітчастого екрана [7], який, на відміну від існуючих, захищає не лише спинку осердя статора, а і найбільш нагріту зону крайніх пакетів статора турбогенераторів – зубці. Спосіб виконання решітчастого екрана полягає у тому, що натискні пальці замикаються мідними кільцями. При розробці конструкції такого екрана необхідно вибрати оптимальну кількість короткозамикаючих кілець і з'єднань з ними пальців, геометричні розміри, місця з'єднань і т. ін., що обумовлює ступінь екранування зубцевої зони статора та рівень нагрівання елементів екрана. У роботі наведено також результати досліджень електромагнітних процесів при різних варіантах виконання екрана.

Відомо, що основні методи досліджень торцевої зони статора – математичне і фізичне моделювання. Фізична модель, яка розроблена і створена в Інституті електродинаміки НАН України і використовувалась при дослідженнях у повній відповідності з теорією моделювання, імітує картину електромагнітного поля в торцевій зоні статора турбогенератора. Вона являє собою трифазну обмотку статора з лобовими частинами, кілька кільцевих крайніх пакетів активного заліза осердя разом з натисною плитою, натискними пальцями і масивним нерухомим ротором [2]. Результати досліджень ефективності екранів генераторів, отримані на фізичній моделі, адекватні результатам, отриманим при натурних випробуваннях. Вони підтверджують наступні порівняння.

Експериментально одержаний на фізичній моделі розподіл осьової складової магнітної індукції в крайніх пакетах осердя статора, перерахований для турбогенератора потужністю 200 МВт, практично співпадає з розподілом осьової складової магнітної індукції, одержаним при натурних випробуваннях у режимі короткого замикання турбогенератора потужністю 200 МВт з встановленими на ньому двома варіантами екрана – решітчастого [7] і відігнутого [5].

У порівнянні з конструкцією торцевої зони з електромагнітним екраном у вигляді електропровідної кільцевої пластини між натисною плитою і натискними пальцями, яка

охоплює натискну плиту з боку розточки осердя статора [5], решітчастий екран зменшує осьову магнітну індукцію на торцевій поверхні крайнього пакета на коронці зубця у 1,5 разу, в середній частині зубця у 2 рази, біля дна паза у 3 рази. Відповідно зменшуються втрати електромагнітної енергії і нагрівання активного заліза. Однак спостерігалось підвищене нагрівання короткозамкнутого мідного кільця у такому виконанні екрана. Тому і виникла потреба дослідити інші способи виконання.

Дослідження різних варіантів виконання решітчастого екрана проводились на фізичній моделі [1] на основі теорії масштабного моделювання та розрахунку електромагнітних процесів для генераторів потужністю 160 МВт, як найбільш типової потужності генераторів з повним повітряним охолодженням, над створенням якої працюють у багатьох країнах світу [2].

Під час експериментів отримано нові дані про розподіл осьової складової магнітної індукції по об'єму крайніх пакетів осердя статора, рівня циркуляційних струмів у елементах електромагнітного екрана і поверхневих струмів у сегментах активного заліза при різних варіантах конструкції екрана. За базову конструкцію прийнято екран з кількома короткозамикаючими кільцями на натискних пальцях з боку розточки статора, кожне з яких з'єднано з різною кількістю натискних пальців. Варіації конструкції екрана стосувалися кількості короткозамикаючих кілець, площі їх перерізу, їх просторового розташування, способу їх з'єднання з натискними пальцями.

Для підвищення інформативності експериментів проведено оснащення фізичної моделі датчиками магнітного поля і струмів у елементах конструкції торцевої зони та застосовано мобільний метод вимірювання індукції магнітного поля у лобовій області дослідження з використання спеціальних планок.

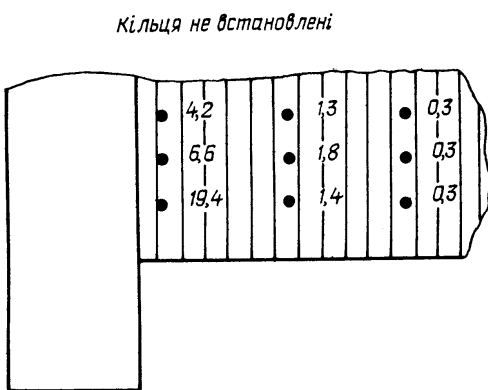


Рис. 1

Основні досліджені варіанти і результати вимірювань осьової складової магнітної індукції (мТл) по висоті крайніх пакетів осердя і циркуляційних струмів у натискних пальцях і короткозамикаючих кільцях показано на рис. 1–5. Там же наводиться характеристика способу виконання решітчастого екрана. У всіх варіантах був встановлений електромагнітний екран за плитою з відгином.

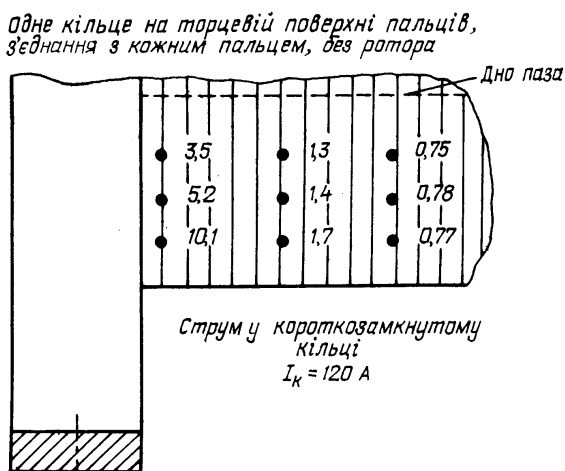


Рис. 2

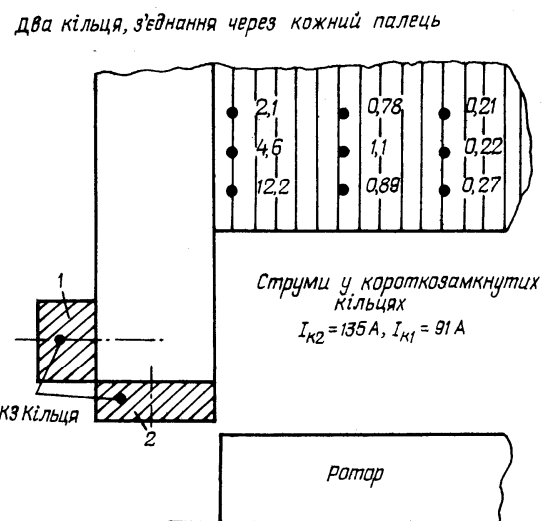


Рис. 3

Одне короткозамкнуте кільце на боковій поверхні пальців, з'єднання через палець

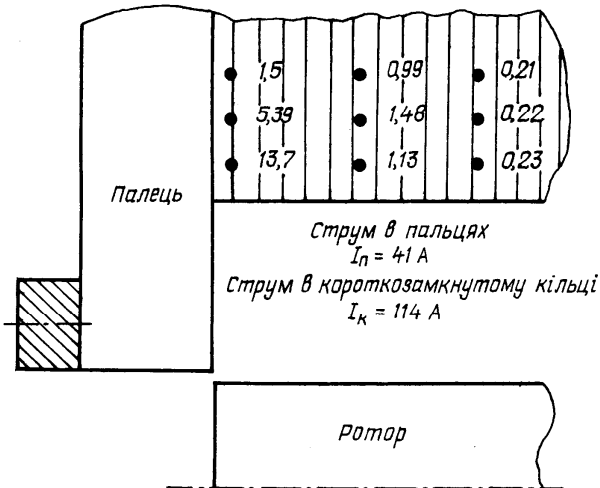


Рис. 4

Два короткозамкнутих кільця, з'єднання з кожним пальцем

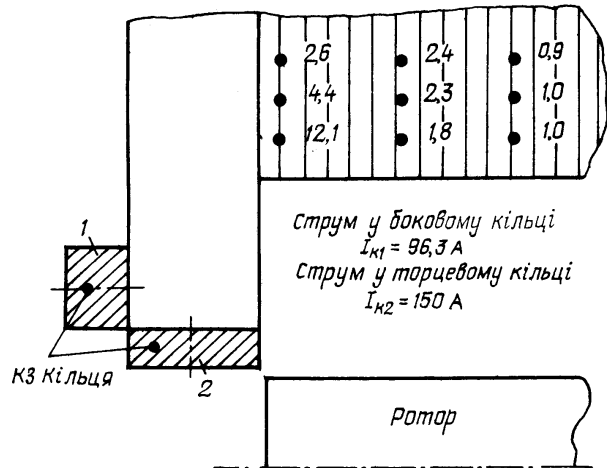


Рис. 5

Як видно, розподіл магнітної індукції у радіальному, тангенціальному і аксіальному напрямках є очікуваним.

Аналіз результатів дослідження показує, що найкращим з точки зору максимального екранування зубцевої зони є варіант, коли кільце найдалше відсунуте у бік розточки статора (рис. 2). Порівнюючи результати вимірювання індукції для вихідного варіанту (рис. 1) можна зазначити, що всі варіанти виконання екрана теж ефективні з точки зору захисту зубцевої зони від полів розсіяння. Тому при виборі способу виконання треба враховувати ряд факторів – технологію виготовлення, коефіцієнт екранування, втрати і температури в окремих елементах екрана і зубцевої зони.

Для дослідження втрат у короткозамкнутих кільцях необхідно враховувати, окрім циркуляційних, також вихрові струми, які наводяться у радіальному полі, витісненому з зазору. Оскільки ці струми не вимірювались на фізичній моделі, то додаткові втрати, обумовлені цим струмом, визначались розрахунково. Розрахунки проведено для генератора потужністю 160 МВт.

Нагрівання елементів самого екрана є досить важливим аспектом його ефективності. Адже випробування цього екрана з одним короткозамикаючим кільцем, встановленим на реальному турбогенераторі потужністю 200 МВт, показали нагрівання кільця у середньому до 190 °С у режимі короткого замикання. При цьому в натискних пальцях протікали циркуляційні струми величиною до 1500 А, а в короткозамикаючому кільці – до 5600 А. Будучи розташованими в зазорі турбогенератора, короткозамикаючі кільця екрана знаходяться під впливом основного магнітного потоку, який «витискається» з зазору. Згідно з [6], з боку зазору на них може потрапляти від 0,4 до 0,8 від номінального основного потоку індукції залежно від режиму роботи та конструкції крайніх пакетів, що призводить до додаткових втрат електромагнітної енергії в них і підвищення їх температури.

Для оцінки рівня нагрівання елементів екрана і було розраховано втрати в них від протікання циркуляційних і вихрових струмів, викликаних потоками магнітної індукції. Відомий метод [3] розрахунку втрат на поверхні конструктивних елементів кінцевих частин турбогенератора має свої обмеження і потребує перевірки при застосуванні до конкретної конструкції. Застосуємо його для розрахунку втрат у короткозамикаючому кільці на згаданому вище турбогенераторі у режимі короткого замикання. Так, об'ємні втрати в тілі короткозамикаючого кільця екрана можуть розраховуватись за формулою для підрахунку об'ємних питомих втрат у провідних масивах від вихрових струмів:

$$P_v = \pi^2 \Delta^2 B^2 (6\rho)^{-1} (0,01f)^2 K_s V \text{ Вт/см}^3, \quad (1)$$

де P_v – питомі втрати, Вт; ρ – питомий опір матеріалу кільця, Ом·см; ω – кругова частота, Гц; B – магнітна індукція на поверхні кільця з боку зазору, Тл; K_s – коефіцієнт; Δ – товщина кільця, см; V – об'єм кільця, см³.

Підставляючи значення відповідних параметрів, одержуємо втрати в об'ємі V кільця:

$$P = P_v \cdot V = 3,14^2 \cdot 2^2 \cdot 0,6^2 \cdot (6 \cdot 0,024)^{-1} \cdot (0,01 \cdot 50)^2 \cdot 0,7 \cdot 6531 = 102431,5 \text{ Вт}.$$

Омічні втрати в кільці:

$$P_{ом} = I_{\phi}^2 \cdot R = 5600^2 \cdot 0,024 \cdot 3,14 \cdot 1,3 / 1600 = 5120 \text{ Вт}.$$

Сумарні втрати в кільці:

$$P_z = 71133 + 5120 = 107551,5 \text{ Вт}.$$

При водневому охолодженні коефіцієнт тепловіддачі в зазорі турбогенератора дорівнює 1200 Вт/м²·°С. Перепад температури з поверхні кільця становить $\Delta T = P_z / (\alpha \cdot S_{ок}) = 76253 / (1200 \cdot 0,4898) = 183$ °С, а абсолютне значення – 226 °С.

Значно більший рівень нагрівання елементів конструкції при повітряному охолодженні, оскільки здатність повітря до тепловідведення у рази нижча, ніж у водню.

Запропоновано низку технічних рішень для зменшення рівня нагрівання елементів електропровідного екрана, у тому числі ті, які пропонувались раніше [8]. Їх суть полягає у виконанні на поверхні короткозамикаючих кілець з боку розточки статора кільцевих канавок, хоча в цьому випадку при розрахунках втрат за формулою (1) похибка зростає. Для порівняння обчислено втрати в одному короткозамикаючому кільці для ряду варіантів конструкції при однаковому значенні магнітної індукції в радіальному напрямку. Так, у варіанті з одним кільцем розміром 2×3 см втрати складуть 45439 Вт, при поділі його на два кільця – 21219 Вт, при поділі на три кільця – 14146 Вт. При виконанні в кільцях кільцевих канавок глибиною 4 мм втрати становлять відповідно 18460, 19702, 7135 Вт. З результатів розрахунків видно, що з точки зору мінімізації втрат найкращим є варіант трьох кілець з канавками.

Отже, результати комплексних досліджень електромагнітних і теплових характеристик на основі математичного і масштабного фізичного моделювання підтверджують високу ефективність решітчастого екрана.

Подальший напрямок досліджень дасть змогу знайти більш досконалу конструкцію торцевої зони статора, у тому числі з точки зору поліпшення технології виготовлення, мінімального нагрівання крайніх пакетів і елементів самого екрана.

1. *Бабяк А.А., Зенцев В.Г., Хлебинский И.В.* Модель для исследования магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в различных нагрузочных режимах // Проблемы технической электродинамики. – К.: Наук. думка, 1973. – Вып. 44.
2. *Кузьмин В.В., Зозулин Ю.В., Черемисов И.Я., Кобзарь К.А.* Новое поколение турбогенераторов с полным воздушным охлаждением // Новини енергетики. – 2001. – № 9. – С. 74–76.
3. *Постников И.М., Станиславский Л.Я., Счастливый Г.Г.* Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. – К.: Наук. думка, 1971.
4. *Сморodin В.И.* Исследование и анализ эффективности конструкции торцевых зон статоров современных и перспективных турбогенераторов. – Киев, 1991. – (Препр. АН УССР. Ин-т электродинамики; № 707).
5. *Сморodin В.И., Крамарский В.И., Руденко Л.И.* Исследование экранирования торца статора турбогенератора от полей рассеяния на масштабной физической модели // Техн. электродинамика. – 1982. – № 5. – С. 64–69.
6. *Титов В.В. и др.* Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – М.: Энергия, 1967.
7. *Пат. 4248 Україна.* Статор електричної машини / В.А. Крамарський, В.В. Кузьмін, В.І. Смородін, І.Я. Черемісов. – Опубл. 27.12.94. Бюл. № 6-1.
8. *Пат. 266 Україна.* Статор електричної машини / В.І. Смородін, В.А. Крамарський, І.Я. Черемісов, В.В. Кузьмін. – Опубл. 30.04.93. Бюл. № 1.

УДК 621.313

А.И. Титко¹, чл.-корр. НАН України, **В.И. Смородин**², докт. техн. наук, **В.А. Крамарский**³, канд. техн. наук, **А.П. Грубой**, гл. конструктор, **И.Я. Черемисов**⁵, канд. техн. наук
1–3 – Ин-т электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
4, 5 – завод «Электротяжмаш»,
г. Харьков, Украина

Исследование эффективности решетчатых экранов статора турбогенератора

Представлены результаты исследований эффективности решетчатых экранов, которые защищают от полей рассеяния зубцы торцевой зоны сердечника статора турбогенераторов, а также результаты расчетов потерь в отдельных элементах таких экранов для генераторов мощностью 160...200 МВт. Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: масштабная физическая модель, турбогенератор, экраны статора, нажимные пальцы, короткозамкнутые кольца, магнитная индукция, потери, температура.

O.I. Tytko¹, V.I. Smorodin², V.A. Kramarskyi³, O.P. Gruboiy⁴, I.J. Cheremisov⁵

1–3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

4, 5 – SE plant Electrovazhmash,

Kharkiv, Ukraine

Investigation of the efficiency of turbogenerator stator lattice screens

Presents the results of efficacy studies of lattice screens that protect against stray fields teeth end zone turbogenerator stator core, and the results of calculations of losses in individual elements of these screens for generators with capacity of 160–200 MW. References 8, figures 5.

Key words: large-scale physical model, turbogenerator, stator screens, push pins, shorted rings, magnetic induction, loss, temperature.

Надійшла 18.01.2012

Received 18.01.2012