

УДК 621.313.322-81

### МАСШТАБНЕ ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНІВ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

О.І. Титко<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН України, В.А. Крамарський<sup>1</sup>, канд.техн.наук, О.П. Грубой<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

<sup>2</sup> – ДП завод «Електроважмаш»,  
пр. Московський, 299, Харків, 61089, Україна.

*Отримано залежності для масштабних коефіцієнтів електромагнітних характеристик при дослідженні решітчастих екранів статора турбогенератора на фізичній моделі. Бібл. 7, табл. 1.*

**Ключові слова:** турбогенератор, екрани статора, натискні пальці, короткозамкнене кільце, масштабна фізична модель, струм, магнітна індукція.

Структурно конструкція кінцевої зони потужних турбогенераторів основних виробників в Україні і в світі за останні роки майже не змінюється, і для забезпечення допустимого рівня температури крайніх пакетів містить такі технологічно-конструкторські елементи: скошені крайні пакети, нажимну плиту і суцільний мідний екран різної геометричної форми, який захищає від поля розсіювання спинку осердя статора. Проте такі екрани не захищають область зубців крайніх пакетів від аксіального магнітного потоку, а іноді навіть підвищують його. Тому і виконують скошення крайніх пакетів та прорізи сегментів, тим самим зменшуючи коефіцієнт використання магнітопроводу статора та механічну стійкість шихтованого осердя. Для нових типів турбогенераторів з розширеними функціональними можливостями доцільно здійснювати подальший пошук екрануючих систем, які б були позбавлені вказаних недоліків.

Наукове обґрунтування нових ефективних екранів, які суттєво зменшують електричні і магнітні втрати та температуру в найбільш відповідальних вузлах потужних турбогенераторів, здійснюється на основі результатів розрахункових та експериментальних досліджень на фізичних моделях і натурних об'єктах в умовах експлуатації. В експлуатаційних умовах дослідно-промисловою перевіркою ефективності екранів турбогенераторів здійснюється лише після розрахункових і експериментальних досліджень на фізичних моделях. Розрахункові дослідження екранів проводяться при розгляді однієї з конструкцій турбогенератора і при його інтенсивних електромагнітних навантаженнях для якісної оцінки їхньої ефективності. На фізичних моделях таких навантажень досягти складно, бо в них задають значно нижчі струми і напруги в обмотках, які збуджують поле, і отже мають місце менш інтенсивні електромагнітні поля. При розгляді екранів складних геометричних форм, композитних та неоднорідних, які включають систему деталей з різними магнітними і електричними характеристиками, складно реалізувати адекватні математичні моделі. Розрахункові дослідження доцільно проводити для визначення особливостей впливу окремих чинників: розмірів і геометрії, характеристик матеріалу екранів в широкому діапазоні їхніх змін. Тому дослідження ефективності таких екранів проводяться системно із застосуванням математичного і фізичного моделювання. Є два підходи до таких досліджень: порівняльний аналіз різних варіантів конструкцій і масштабне моделювання з подальшими перерахунками електромагнітних характеристик для того чи іншого типу турбогенераторів. Представимо методичні засоби для масштабного моделювання електромагнітних процесів в екрануючій системі осердя статора турбогенератора [4], що містить нажимну плиту, електропровідний екран, встановлений за нажимною плитою у вигляді диска з відгином, який закриває внутрішню циліндричну поверхню плити, натискні пальці та систему електропровідних кілець, електрично з'єднаних з натискними пальцями з боку розточки статора. Дослідження такої системи проведено на масштабній фізичній моделі торцевої зони турбогенератора [1, 7], на якій досить багато і успішно було досліджено інші конструкції екранів [5, 6], в основному, на основі порівняльного аналізу. Модель виконано як масштабну для генератора потужністю 500 МВт.

Для квазістаціонарного поля в лінійному ізотропному середовищі критерій подібності має вигляд [2]

$$m_{\mu} \cdot m_{\sigma} \cdot m_l^2 \cdot m_f = 1, \quad (1)$$

де  $m_l$ ,  $m_f$  – лінійний масштаб і масштаб частоти відповідно,  $m_{\mu}$ ,  $m_{\sigma}$  – масштаби по магнітній проникності та електропровідності матеріалу, з якого виконано вузол, що моделюється, які можна визначити для лінійних середовищ (масштаб довільної величини  $m_a = a_e / a_m$ ,  $a_m$  – величина моделі,  $a_e$  – величина генератора). Для визначення характеристик поля в повітряному середовищі ( $m_{\sigma} = m_{\mu} = 1$ ) кінцевої зони турбогенератора потужністю 500 МВт середній лінійний масштаб складає  $m_l = 3,5$ . Тоді за виразом (1)  $1/m_f = 12,25$ . Тобто, експерименти на моделі потрібно проводити при частоті струму, близької до 600 Гц. Визначення масштабних коефіцієнтів для фізичної моделі треба проводити для кожної деталі, яка досліджується, окремо. Отже, знайдемо ці масштабні коефіцієнти для екрана вказаної конструкції [4] з метою обґрунтування її ефективності, а саме мінімізації температури крайніх пакетів осердя статора і окремих елементів самого екрана.

При дослідженні ефективності вибраної екрануючої системи як базової для подальшого її вдосконалення необхідно визначати характеристики аксіального поля за екрануючою системою та струми, втрати і температуру в елементах такої системи і, перш за все, в окремих пальцях і замикаючих кільцях. Наведемо ряд співвідношень, на основі яких можна зробити перерахунки для конкретного типу генератора вказаних характеристик, отриманих на фізичній моделі. Визначення індукції магнітного поля в області екрана і за ним на поверхні крайнього пакету магнітопроводу статора можна здійснювати двома шляхами. Беручи до уваги поняття «центр ваги» струмів лобової частини обмотки статора, можна користуватися співвідношенням, яке отримано у [7] на основі закону повного струму,

$$m_{H_z} = m_{L_n} / m_l, \quad (2)$$

де  $m_{H_z} = H_z / H_m$ ,  $m_{L_n} = A_{L_n} / A_{L_m}$ ,  $m_l = r_e / r_m$ , індекс «m» належить моделі, індекс «z» – генератору, величини  $A_n$ ,  $r$  – відповідно лінійне навантаження лобової частини обмотки статора та відстань «центра ваги» струмів лобової частини від точки визначення характеристики поля.

Більш точно масштабні коефіцієнти для визначення поля в генераторі за даними експериментів на фізичній моделі можна визначати, виходячи із результатів математичного моделювання електромагнітного поля в кінцевих зонах генераторів без екрана, беручи до уваги, що такі моделі досить легко можна адекватно побудувати і реалізувати. Окрім того, це дає можливість врахувати складний розподіл поля в різних режимах роботи ТГ, коли поле збуджується обмотками ротора і статора, струми яких мають зсув фаз, який залежить від режиму роботи.

Якщо на фізичній моделі в елементах екрануючої системи вимірюється густина струму, наприклад, потенціальними зондами, то масштабний коефіцієнт розраховується за формулою

$$m_j = m_{H_z} \cdot m_f \cdot m_s / m_l, \quad (3)$$

де  $m_j$ ,  $m_s$  – масштаби за густиною струму та площею, яку обіймає лінія струму і пронизує магнітний потік. Співвідношення (4) витікає з закону електромагнітної індукції.

При вимірюванні на фізичній моделі циркуляційних струмів, наприклад, поясами Роговського, струми в мідних кільцях генератора визначаються наближено за струмами в моделі на основі масштабного коефіцієнту  $m_s$  для поперечного розрізу кілець. Ступінь наближення характеризується рівнем прояву скін-ефекту при протіканні струму по кільцю. При суттєво нерівномірному розподілі струму в області поперечного розрізу кільця необхідно врахувати це явище наступним чином. На основі рівняння (3) коефіцієнт для перерахунку циркуляційного струму в кільці знаходимо так:

$$m_l = m_{H_z} \cdot m_f \cdot m_s / m_R, \quad (4)$$

де  $m_R$  – масштабний коефіцієнт за опором екрануючої системи. Для розрахунку опору екрануючої системи вона може бути представлена у вигляді «білячої клітки», для якої отримано співвідношення для загального опору  $R$  [3]

$$R = R_{II} + R_x \cdot z^2 / 2p^2 \cdot \pi^2, \quad (5)$$

де  $R_{II}$  – опір одного натискного пальця,  $R_x$  – опір короткозамкнених кілець,  $z$  – кількість натискних пальців,  $p$  – число пар полюсів. Натискні пальці виготовляють із сталі, магнітна проникність  $\mu$  якої залежить від  $H$ . Тому задовольнити критерій подібності поля (1) у самих пальцях складно. При розрахунку опору  $R_{II}$  доцільно враховувати збільшення опору за рахунок затухання характеристик поля в середині пальця, яке в даному випадку не масштабується. При визначенні втрат також доцільно враховувати різні в моделі та генераторі коефіцієнти затухання поля в короткозамкнених кільцях і пальцях. Для цього густина струму представляється так:

$$J = J_0 [e^{-kx} + e^{-k(h-x)}] \times [e^{-ky} + e^{-k(h-y)}], \quad (6)$$

де  $J_0$  – густина струму на поверхні елементів екрана;  $k$  – коефіцієнти затухання поля в масиві кілець і пальців; величини  $h, h_l$  – розміри поперечного перерізу кільця чи пальця, який представляє собою прямокутник. Початок системи координат  $\overline{OX\overline{Y}}$  розміщено в одному з кутів прямокутника, а осі  $OX, OY$  співпадають з його сторонами.

При нерівномірному розподілі густини струму в поперечному перерізі кільця чи пальців співвідношення між струмом і густиною має вигляд

$$I = 4J_0 k^{-2} (1 - e^{-kh})(1 - e^{-kh_l}). \quad (7)$$

Як відомо, об'ємні та сумарні втрати визначаються виразами

$$P = J^2 / \sigma, \quad P = L \int_0^h \int_0^{h_l} (J^2 / \sigma) dx dy, \quad (8)$$

де  $L$  – довжина лінії струму в елементі екрануючої системи.

Враховуючи (4, 5), а також визначення струму як  $I = \int_S \vec{J} \cdot \vec{ds}$ , масштаб за струмом в кільцях і

пальцях можна визначити так:  $m_l = m_{H_z} \cdot m_f \cdot m_s \cdot m_{S_1} / m_l$ , де  $S_1$  – площа поперечного перерізу провідника, по якому протікає струм. Із цього виразу видно, що для визначення масштабного коефіцієнта для  $S_1$  необхідно знаходити еквівалентну площу  $S_{1екв} = 4k^{-2} (1 - e^{-kh})(1 - e^{-kh_l})$ .

Звісно, що при обґрунтуванні того чи іншого екрана треба, в першу чергу, визначити поле за екраном, вихрові струми, втрати та нагрів крайніх сегментів осердя статора та екрана. Для даної екрануючої системи, в силу її специфіки, суттєвим є розрахунок нагріву короткозамкнених кілець.

Розглянемо застосування запропонованої методики для визначення ефективності такої екрануючої системи в турбогенераторі потужністю 200 МВт типу ТГВ-200-2М. В таблиці наведено дані для моделі і генератора, необхідні для визначення масштабних коефіцієнтів перерахунку результатів експерименту. Як видно із розрахунків (табл., останні чотири позиції), за середній лінійний коефіцієнт масштабу можна прийняти 3,1. Тоді за критерієм подібності (1) експерименти доцільно проводити при частоті 480 Гц. В експериментах на моделі цю частоту було прийнято за базову.

Експерименти на моделі проводилися для варіанту, коли всі натискні пальці замикалися одним

№ п/п		Фізична модель	Турбогенератор типу ТГВ-200-2М
1	Кількість пальців	48	90
2	Розміри пальців, мм	9•10•140	38•30•590
3	Кількість пальців на зубці, шт.	1	3
4	Кількість короткозамкнених кілець, шт.	1	1
5	Поперечні розміри кільця, мм	2•8	20•80
6	Діаметр кільця, мм	390	1127
7	Струм обмотки стержня, А	100	8
8	Лінійне навантаження струмів статора в режимі КЗ, А/см	78,4	1292,5
9	Відстань від «центра ваги» лобових частин обмотки статора до «центра ваги» екрануючої системи, мм	150	290
10	Частота струму обмотки статора, 1/сек	480	50
11	Висота зубця статора, мм	67	185
12	Висота спинки заліза статора, мм	108	334
13	Діаметр розточки статора, мм	389	1275
14	Діаметр активного заліза статора, мм	740	2430

мідним кільцем, так як для цього варіанту є експериментальні дані, отримані при випробуванні турбогенератора потужністю 200 МВт в режимах ХХ і КЗ.

Отримано такі результати вимірювань на фізичній моделі: струм у кільці – 156 А, струм у пальцях – 42 А, індукція магнітного поля обмотки в зоні екрануючої системи при відсутності короткозамкненого кільця – 0,019 Тл, індукція магнітного поля за екрануючою системою при наявності кільця – 0,010 Тл.

Виконаємо розрахунок струмів для визначення втрат та температури в короткозамкненому кільці при його наявності в конструкції генератора потужністю 200 МВт в режимі КЗ, тобто тих величин, для яких є дані випробувань генератора на стенді заводу. При цьому для  $H_z$  обрано експериментальні дані, струм у кільці при випробуваннях дорівнював 5590 А. Для розрахунку струму в мідному кільці генератора в режимі

КЗ на основі масштабного моделювання отримуємо такі масштабні коефіцієнти:  $m_f=0,104$ ;  $m_l=3,32$ ;  $m_{Hz}=6,01$ ;  $m_s=12,27$ ;  $m_{s1}=17,45$ ;  $m_l=41$ . Тоді розрахункове значення струму в кільці дорівнюватиме 6396, що на 14% відрізняється від експериментального значення. Завишене значення знайденого струму обумовлено тим, що при розрахунках не враховувалися збільшення опору в пальцях на моделі у змінному електромагнітному полі.

Слід відзначити, що моделювання процесів в елементах решітчастого екрана в цій роботі проведено за умови, що процеси в екрані визначаються аксіальним потоком, який і екранує дана конструкція. В певних випадках, наприклад, коли геометрія мідного кільця допускає наведення в ньому додаткового струму від радіального потоку, для визначення сумарних втрат і температури в мідних кільцях треба враховувати вплив радіального потоку. Тоді масштабне моделювання треба проводити окремо лише для визначення струму в кільці від радіального потоку.

Отже, запропонована методика та отримані залежності масштабного моделювання дозволяють з необхідною для практики точністю досліджувати на фізичній моделі перспективні екрануючі системи та інші вузли турбогенераторів довільної потужності, які забезпечать в їхніх нових перспективних типах значне спрощення виконання кінцевих зон, забезпечуючи високу надійність машин в експлуатації.

1. Бабяк А.А., Зенцев В.Г., Хлебинский И.В. Модель для исследования магнитного поля в концевой зоне турбогенераторов в различных режимах // Проблемы технической электродинамики. – 1974. – Вып. 44. – С. 28–32.
2. Веников В.А., Иванов-Смоленский А.В. Физическое моделирование электрических систем. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 639 с.
4. Патент України № 303. Статор электрической машины / Смородін В.І., Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Кузьмін В.В., Ракогон В.Т. // БИ. – 1993. – № 1.
5. Смородин В.И., Карацуба А.С., Руденко Л.И. Исследование экранирования торца статора турбогенератора от полей рассеивания на магнитной физической модели // Техн. электродинамика. – 1982. – № 5. – С. 64–69.
6. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – Киев: Наукова думка, 1994. – 139 с.
7. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. Под общ. ред. И.М. Постникова. – К.: Наукова думка, 1971. – 358 с.

УДК 621.313.322-81

#### МАСШТАБНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНОВ СТАТОРА МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

А.И. Титко<sup>1</sup>, чл.-корр. НАН Украины, В.А. Крамарский<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А.П. Грубой<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

<sup>2</sup> – ДП завод «Электровозмаш», пр. Московский, 299, Харьков, 61089, Украина.

Получены зависимости для масштабных коэффициентов электромагнитных характеристик при исследовании решетчатых экранов статора турбогенератора на физической модели. Библи. 7, табл. 1.

**Ключевые слова:** турбогенератор, экраны статора, нажимные пальцы, короткозамкнутое кольцо, масштабная физическая модель, ток, магнитная индукция.

#### SCALE PHYSICAL MODELING OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD AT RESEARCH OF EFFICIENCY OF SCREENS STATOR POWERFUL TURBOGENERATORS

O.I. Tytko<sup>1</sup>, V.A. Kramarskyi<sup>1</sup>, A.P. Gruboi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Ukraine, Peremogy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine,

<sup>2</sup> – SE plant «Electrovazhmash», pr. Moskovskiy, 299, Kharkiv, 61080, Ukraine.

Dependences for scale factors of electromagnetic characteristics are received at research of trellised screens a stator turbogenerator on physical model. References 7, table 1.

**Key words:** a turbogenerator, screens stator, press fingers, a short-circuited ring, scale physical model, a current, a magnetic induction.

1. Babiak A.A., Zentsev V.G., Khlebinskii I.V. Model for research of a magnetic field in a trailer zone of turbogenerators in various modes // Problemy Tekhnicheskoi Elektrodinamiki. – 1974. – Vol. 44. – Pp. 28–32. (Rus)
2. Venikov V.A., Ivanov-Smolenskii A.V. Physical modelling electric systems. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1958. (Rus)
3. Voldek A.I. Electric machine. – Leningrad: Energiia, 1974. – 639p. (Rus)
4. Patent of Ukraine № 303. Stator the electric machine / Smorodin V.I., Kramarskyi V.A., Cheremisov I.Ya., Kuzmin V.V., Rakogon V.T. / Bulletin Izobretenii. – 1993. – №1. (Ukr)
5. Smorodin V.I., Karatsuba A.S., Rudenko L.I. Research of shielding of an end face a stators turbogenerator from fields of dispersion on magnetic physical model // Tekhnicheskaja Elektrodinamika. – 1982. – № 5. – Pp. 64–69. (Rus)
6. Tytko A.I. Electromagnetic shielding by the open-ended structures in electric machines. – Kiev: Naukova dumka, 1994. – 139 p. (Rus)
7. Electromagnetic and thermal processes in trailer parts of powerful turbogenerators. Pod obsh. red. I.M.Postnikova. – Kiev: Naukova dumka, 1971. – 358 p. (Rus)

Надійшла 09.02.2012

Received 09.02.2012