

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ У ДЕМПФЕРНІЙ СИСТЕМІ РОТОРІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ПРИ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ

Ю.М.Васьковський¹, докт.техн.наук, С.С.Цивінський², О.І.Титко¹, чл.-кор. НАН України

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

² – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

e-mail: yun157@gmail.com

При тривалій експлуатації потужних гідрогенераторів виникає нерівномірність повітряного проміжку між статором і ротором, внаслідок чого в полюсах ротора спостерігаються пульсації магнітного потоку, а в стержнях демпферної системи ротора протікають індуковані струми. Розподіл струмів між стержнями є нерівномірним, що спричиняє значні термомеханічні деформації демпферної системи та пульсуючі електромагнітні сили, що діють на її стержні. Оскільки відомі технічні заходи для підтримки рівномірності проміжку в гідрогенераторах є недостатньо ефективними, необхідно удосконалення демпферних систем для підвищення їхньої стійкості. Розроблено нову математичну модель, проаналізовано фізичні процеси та виявлено основні причини підвищеної пошкоджуваності демпферної системи при наявності ексцентриситету ротора. Запропоновано технічні рішення, які суттєво зменшують термомеханічні деформації та пульсуючі сили в стержнях ротора. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: гідрогенератор, демпферна система ротора, ексцентриситет ротора, польова математична модель.

Вступ. В потужних гідрогенераторах (ГГ) відношення висоти повітряного проміжку між полюсами ротора до діаметру розточки статора складає усього 0,1...0,3%. Наприклад, в ГГ типу СВ 1230/140 - 56 потужністю 130,6 МВА діаметр розточки статора дорівнює 11600 мм, а висота повітряного проміжку – 20 мм. Для капсульного ГГ типу СГК 538/160 - 70М потужністю 23 МВА ці розміри дорівнюють відповідно 6100 мм і 6 мм. Такі особливості конструкції ГГ обумовлюють швидку появу в процесі експлуатації ГГ нерівномірності повітряного проміжку уздовж розточки статора. Нерівномірність може виникати внаслідок появи ексцентриситету ротора або втрати циліндричності форм осердя статора або ротора. Практика експлуатації показує, що відомі технічні заходи для підтримки рівномірності проміжку в процесі тривалої експлуатації ГГ є недостатньо ефективними [3].

Як наслідок нерівномірності повітряного проміжку при обертанні ротора в полюсах ротора виникають пульсації основного магнітного потоку. В свою чергу пульсації потоку призводять до появи ЕРС і струмів, які замикаються в стержнях і короткозамикаючих (КЗ) сегментах демпферної системи (ДС), яка розташована в полюсах ротора ГГ. Зрозуміло, що ці струми не пов'язані з роботою ГГ в асинхронних і несиметричних режимах, а обумовлені виключно появою дефектів в ГГ, що призводять до порушення рівномірності повітряного проміжку. Хоча частота пульсацій невелика і складає 1... 2 Гц, а величина ЕРС не перевищує декілька вольт, внаслідок малого власного опору ДС величини струмів сягають небезпечних значень і протікають вони тривало. Причому між різними стержнями ДС індуковані струми і відповідний їхній нагрів розподілені дуже нерівномірно, що призводить до значних внутрішніх термомеханічних деформацій у ДС і подальшої її руйнації.

Зазначене явище було досліджено в роботах [3–8] методами математичного моделювання. Але використані в цих роботах математичні моделі мали низку суттєвих припущень, що зменшило достовірність отриманих результатів. Також у подальшому був виявлений додатковий негативний фактор, який потребує ретельного вивчення. Окрім термомеханічних деформацій ДС внаслідок нерівномірності повітряного проміжку на стержні ДС діють значні пульсуючі електромагнітні сили, які "розхитують" ДС, прискорюючи її руйнацію. В процесі експлуатації ГГ різного типу виявлено чимало випадків ушкодження ДС [3]. Слід підкреслити, що в існуючих ГГ конструкція ДС створювалася без урахування наслідків нерівномірності повітряного проміжку. Тому існує нагальна потреба в удосконаленні ДС, зокрема введення на етапі проектування в їхню конструкцію певних технічних рішень, що забезпечують стійкість ДС до нерівномірності повітряного проміжку ГГ. Такі технічні рішення можна знайти на основі результатів математичного моделювання електромагнітних процесів в

ГГ, що мають нерівномірний повітряний проміжок. Метою статті є аналіз з використанням нових польових математичних моделей електромагнітних процесів в ДС ГГ за наявності нерівномірного повітряного проміжку ГГ та наукове обґрунтування способів удосконалення конструкції ДС.

Математична модель. Рівняння електромагнітного поля ГГ відносно векторного магнітного потенціалу A_z доцільно сформулювати в двовимірній постановці без урахування впливу торцевих частин ГГ

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{стор}}, \quad (1)$$

де μ – магнітна проникність, $J_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів (густина струмів в обмотці збудження на роторі). Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду $A_z|_{G_1, G_2} = 0$ на лініях G_1 зовнішньої поверхні ярма статора і G_2 – внутрішньої поверхні ярма ротора.

Рівняння (1) розв'язується в межах інтервалу часу $[0 \dots T]$, де T – період часу, який відповідає одному повному оберту ротора ГГ. При розв'язанні задачі інтервал часу розділяється на N рівних кроків розміром Δt . При цьому, з урахуванням обертання ротора координати (x, y) точок ротора є функціями часу. Приріст декартових координат ротора $\Delta x, \Delta y$ на кожному кроці по часу Δt задається наступними формулами:

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot x - \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot y - x, \\ \Delta y(t) &= \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot x + \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot y - y, \end{aligned} \quad (2)$$

де ω_R – кутова частота обертання ротора.

Складові вектора магнітної індукції B_x і B_y та напруженості електричного поля E_z в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями

$$B_x = \partial A_z / \partial y, \quad B_y = -\partial A_z / \partial x, \quad E_z = -\partial A_z / \partial t. \quad (3)$$

Для розрахунку ЕРС, яка індукується в контурах ДС, використовується інтегральний вираз

$$U(t) = \frac{2 \cdot I_{cm}}{S_{cm}} \int_{S_{cm}} E_z \cdot ds, \quad (4)$$

де S_{cm}, L_{cm} – площа поперечного перетину і довжина стержня ДС.

Сумарний активний опір кожного КЗ контуру ДС, який складається з двох стержнів і двох КЗ торцевих сегментів, визначається так

$$r_{ДС} = 2(r_{cm} + r_k) = 2\rho_{ДС} (l_{cm} / S_{cm} + l_k / S_k), \quad (5)$$

де $\rho_{ДС}, l_k, S_k$ – питомий опір стержнів і КЗ сегментів, довжина та площа перетину КЗ сегмента.

Для визначення індуктивних опорів контурів ДС використовується польова методика [2]. В рамках двовимірної польової моделі індуктивний опір контуру знаходиться як опір двох стержнів ДС за результатами розрахунків електромагнітного поля за наступним виразом:

$$x_{ДС} = 2\pi f_{ДС} \Psi_{ДС} / I_{ДС} = \frac{4\pi f_{ДС} l_{cm}}{S_{cm}} \left(\int_{S_{cm}} A_z ds \right) / I_{ДС}, \quad (6)$$

де $f_{ДС}, \Psi_{ДС}, I_{ДС}$ – частота струму в ДС, магнітне потокозчеплення контуру ДС, заданий струм у контурі. Розрахунок ведеться за умови, що джерелами поля є тільки струми у стержнях. Величини струмів підбираються таким чином, щоб магнітний потік полюсів був таким самим, як і в режимі роботи ГГ, що розглядається. Виконання цієї умови забезпечує адекватний рівень насичення магнітопроводу, що має важливе значення при урахуванні впливу насичення магнітопроводу на індуктивні параметри контурів ДС.

Індукований струм в контурі ДС знаходиться за виразом

$$I_{ДС}(t) = U(t) / \sqrt{r_{ДС}^2 + x_{ДС}^2}. \quad (7)$$

Розрахунок електромагнітних сил виконується за допомогою тензора магнітного натягу. В довільній точці M нормальна (направлена уздовж вектора нормалі) T_{nM} і тангенціальна (направлена уздовж дотичної) $T_{\tau M}$ складові тензора магнітного натягу розраховуються за наступними формулами:

$$T_{nM}(t) = \frac{1}{2\mu_0} \cdot [B_{nM}^2 - B_{\tau M}^2], \quad T_{\tau M}(t) = B_{nM} B_{\tau M} \mu_0^{-1}, \quad (8)$$

де $B_{nM}, B_{\tau M}$ – нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції в точці М, які знаходяться через складові індукції в декартових координатах, що визначаються за формулами (3)

$$B_n = (B_x \cdot x + B_y \cdot y) / R_\delta, \quad B_\tau = (B_x \cdot y - B_y \cdot x) / R_\delta, \quad (9)$$

де R_δ, x, y – радіус-вектор і координати точки М.

Таким чином, на кожному кроці по часу розв'язується стаціонарне рівняння (1) для різних положень ротора. Об'єднання отриманих розв'язків на інтервалі часу $[0 \dots T]$ дає часові залежності векторного магнітного потенціалу й усіх інших величин, що визначаються через його значення. Чисельне розв'язання моделі виконано методом скінченних елементів.

Результати досліджень. Аналіз доцільно провести для режиму холостого ходу за умови, що основний магнітний потік ГГ створюється обмоткою збудження, а обмотка статора розімкнена. Для досліджень обрано ГГ з наступними даними: номінальна потужність – 26,2 МВА; номінальна лінійна напруга – 10,5 кВ; кількість полюсів – 48; номінальна частота обертання – 125 об/хв.; діаметр розточки статора – 6500 мм; зовнішній діаметр ярма статора – 7040 мм; повітряний проміжок – 18 мм; ширина полюса ротора – 310 мм; висота полюса ротора – 292 мм; кількість стержнів ДС на одному полюсі ротора – 6; діаметр стержня – 16 мм; струм холостого ходу – 742 А.

Загальний вигляд розрахункової зони показано на рис. 1, а, на рис. 1, б зображено фрагмент розрахункової зони в межах одного полюсу. Інтервал часу дорівнює 0,48 с, що відповідає одному

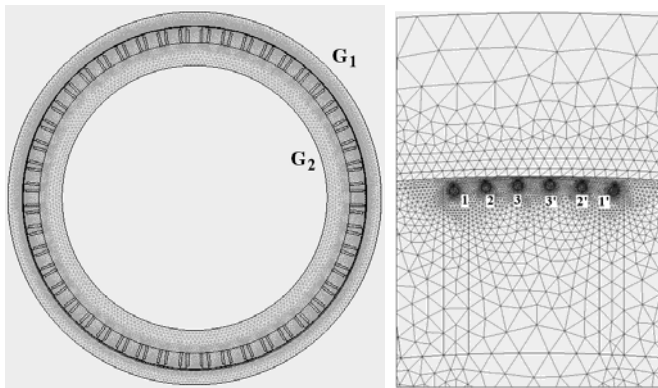


Рис. 1, а, б

оберту ротора, крок по часу склав $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3}$ с, а число кроків – 240. Для зменшення витрат розрахункового часу ПК можна припустити, що осердя статора не має пазів, що, у цілому, не впливає на остаточний результат при коригуванні величини повітряного проміжку.

Представлено результати моделювання при наявності статичного ексцентриситету, що характеризується такими даними: максимальний проміжок – $\delta_{max} = 27$ мм; мінімальний проміжок – $\delta_{min} = 9$ мм. Відносний ексцентриситет складає $\varepsilon = (\delta_{max} - \delta_{min}) / (\delta_{max} + \delta_{min}) = 0,5$.

Частота струму в стержнях ДС дорівнює 2,08

Гц. Прийняття припущення щодо безпазової поверхні розточки статора веде до нехтування зубцевими ЕРС, які індукуються в ДС, але попередні оцінки показують, що вони є незначними. Окрім того, наявність зубцевих ЕРС не обумовлена ексцентриситетом ротора. Пари стержнів 1-1', 2-2', 3-3' (рис. 1, б) в межах полюсу ротора замкнені між собою через торцеві КЗ сегменти і формують контури, по яких протікають індуквані струми. Величини ЕРС, струмів і сил в контурах суттєво залежать від площі контуру, яка охоплює відповідну поверхню полюсу. На рис. 2 за час одного повного повороту ротора зображено часові залежності струмів в контурах 1-1', 2-2', 3-3' (рис. 2, а) та електромагнітних сил (рис. 2, б), що діють на стержні 1, 2, 3 ДС у напрямку до повітряного проміжку.

Результати розрахунків дозволяють зробити наступні висновки: 1) максимальні амплітуди струмів в ДС сягають небезпечних величин 2,8 кА; 2) розподіл струмів між контурами є суттєво нерівномірним: максимальні струми протікають по контуру 1-1', який охоплює найбільшу площу полюса. Амплітуда струму у внутрішньому контурі 3-3' складає 730 А (тобто в 3,8 рази менше за струми в контурі 1-1'), що пояснюється меншою величиною індукованої ЕРС і більшим його індуктивним опором, який в 1,47 разів перевищує опір контуру 1-1'; 3) нерівномірність розподілу струмів породжує суттєву нерівномірність втрат і нагріву стержнів ДС, що спричиняє значні внутрішні термомеханічні напруженості в ДС; 4) амплітуди пульсуючих електромагнітних сил, що діють на крайні стержні 1 і 1' у напрямку нормалі до повітряного проміжку ГГ, сягають значної величини, близької до 500 кгс, що призводить до поступового “розхитування” крайніх стержнів на полюсах ДС. У той же час

амплітуда знакозмінних сил в стержнях 2 і 2' є значно меншою, а на стержні 3 і 3' діють мінімальні сили.

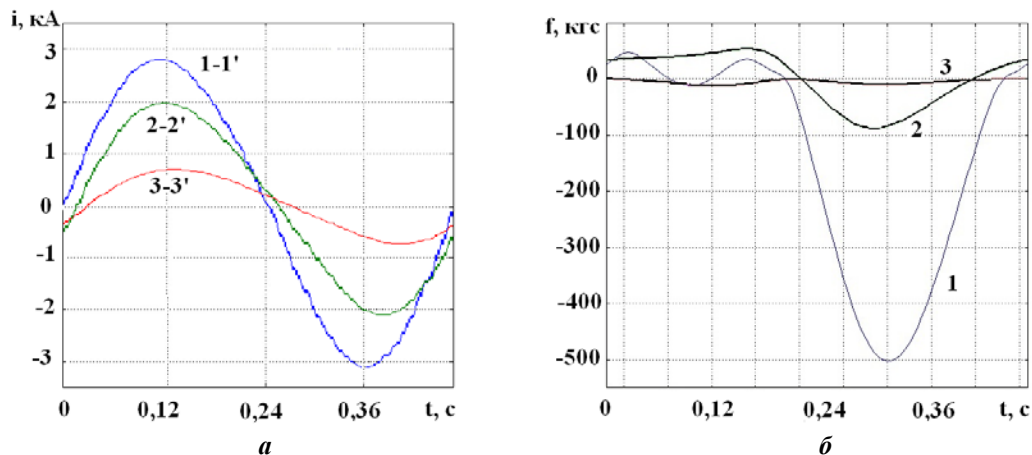


Рис. 2

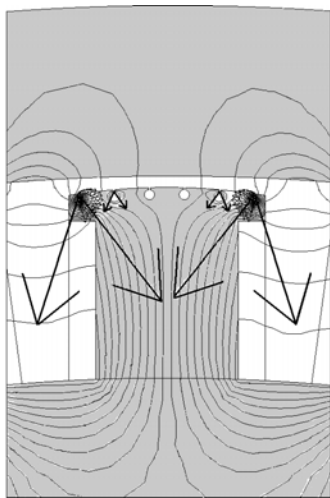


Рис. 3

Отримані результати пояснюються особливостями розподілу поля і сил в ДС. На рис. 3 в межах одного полюса ротора зображено картину силових ліній магнітного поля та розподіл вектора електромагнітної сили (показано стрілками), що діють на стержні ДС. З рис. 3 видно, що основні сили прикладені до крайніх стержнів полюсу, причому найбільша складова вектора сили спрямована в напрямку нормалі до поверхні полюсу. Це пояснюється як максимальними значеннями струмів в крайніх стержнях, так і викривленням силових ліній на краях полюсів. Саме тангенціальна (направлена уздовж поверхні полюсу) складова магнітної індукції породжує нормальну (направлену перпендикулярно поверхні полюсу) складову електромагнітної сили. Отриманий результат підтверджується відомими фактами ушкоджень ДС, при яких ушкоджуються саме крайні стержні полюсів демпферної системи [3].

Аналогічні результати отримано при моделюванні інших типів ГГ при наявності в них ексцентриситету ротора. Найбільша нерівномірність розподілу струмів і нагріву виникає при наявності на полюсі непарної кількості стержнів, коли один із них розташований по центру полюса. У таких конструкціях по центральному стержню струм не протікає, і тому нерівномірність нагріву стержнів ДС є найбільшою.

Проведений аналіз дозволив сформулювати загальний принцип, який повинен бути покладений в основу способів та технічних рішень щодо забезпечення стійкості ДС гідрогенераторів: необхідно зменшити нерівномірність розподілу струмів і нагріву між окремими стержнями на полюсі ротора ГГ, яка виникає при появі ексцентриситету ротора, а також зменшити величини пульсуючих електромагнітних сил, що діють на крайні стержні полюсів.

Зменшення нерівномірності розподілу струму, втрат і сил можливо за рахунок зменшення величин струму і втрат в крайніх стержнях полюсу, а також за рахунок вилучення центрального стержня, якщо такий є, по якому струм не протікає. Для зменшення струму в крайніх стержнях необхідно зменшувати ЕРС в контурі з найбільшою площею (контур 1-1'), збільшуючи індуктивний опір крайніх стержнів і зменшуючи їхній активний опір для зменшення втрат.

Важливим методом пошуку ефективної конструкції ДС ГГ є оптимізація локального розташування стержнів на полюсі ротора. Стержні усіх полюсів ГГ за допомогою КЗ сегментів та міжполюсних перемичок з'єднані між собою і створюють єдину замкнену демпферну систему ротора. Тому зміна локального розташування стержнів в межах полюсу цілком можлива, оскільки не впливає на інтегральні параметри демпферної системи і асинхронні характеристики ГГ. Було проаналізовано різні варіанти локального розташування стержнів на полюсі: "рівномірний", як у базового ГГ при рівномірному розташуванні стержнів на полюсі з відстанню (кроком) між стержнями 55 мм (рис. 1, б); "стиснутий", при якому стержні у вигляді компактної групи з кроком 45 мм розташовані біля цент-

ральної осі полюсу; “розтягнутий”, коли стержні у вигляді двох компактних груп з кроком 45 мм розташовані на краях полюса.

Як в “стиснутому”, так і в “розтягнутому” варіантах ДС спостерігається зменшення нерівномірності розподілу індукованих струмів між стержнями. Але величини струмів і втрат в “розтягнутому” варіанті є значно вищими, що пов’язано з більшою площею контурів, в яких індукуються струми. До того ж розташування стержнів на краях полюсу призводить до погіршення форми магнітного поля у повітряному проміжку, що викликано додатковим магнітним насиченням ділянок на краях полюсів. Негативним фактором є також зменшення механічної стійкості конструкції полюса. У порівнянні з базовим “рівномірним” варіантом струми в контурі 1-1 “стиснутого” варіанту ДС зменшилися в 1,4 рази.

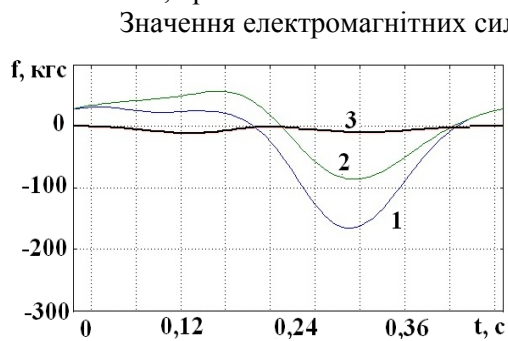


Рис. 4

Значення електромагнітних сил, що діють на крайні стержні в “стиснутому” варіанті, також є значно меншими. На рис. 4 зображено часові залежності нормальних складових електромагнітних сил, що діють на стержні ДС в “стиснутому” варіанті. Порівняння кривих для крайніх стержнів 1 на рис. 4 з аналогічними кривими на рис. 2, б показує суттєве (в 3 рази) зменшення цих сил.

Слід зазначити, що при виборі кількості стержнів ДС і їхніх параметрів необхідно також притримуватися загальних рекомендацій щодо проектування ГГ [1], які забезпечують достатню величину асинхронного електромагнітного моменту ГГ при коливаннях ротора і в асинхронному ході, допустиме значення показника термічної стійкості ДС

ротора на рівні $I_2^2 t \geq 40$, урахування впливу зубцевих гармонік від зубців статора тощо. В даному випадку параметри ДС були узгоджені з зазначеними рекомендаціями.

Таким чином, оптимальне розташування стержнів на полюсі ротора дозволяє без будь-яких додаткових витрат суттєво мінімізувати негативні фізичні процеси, що виникають в ДС ГГ при появі ексцентриситету ротора ГГ, та підвищити їхню експлуатаційну надійність. Зокрема, при проектуванні полюсів ротора ГГ необхідно стержні ротора розміщувати компактною групою в центральній частині полюсу симетрично до його центральної осі, що, у порівнянні з традиційними конструкціями ДС ГГ при рівномірному розташування стержнів ДС на полюсі ротора, дозволяє зменшити струми в крайніх стержнях в 1,4 ... 1,6 разів, а амплітуди пульсуючих електромагнітних сил зменшити в 2,5 ... 3 рази. Причому, кількість стержнів на полюсі повинна бути парною та мінімально можливою з точки зору забезпечення необхідних асинхронних характеристик гідрогенератора.

Як свідчать отримані результати досліджень, найбільшу небезпеку для ДС складають фізичні процеси, що відбуваються в крайніх стержнях ДС. Тому додатковим способом зменшення нерівномірності розподілу струмів і втрат в стержнях ДС є оптимізація електричних параметрів крайніх стержнів – їхніх активного і індуктивного опорів – з метою зменшення нерівномірності розподілу струмів і нагріву в ДС. Розрахунки за формулами (5), (6) показують, що індуктивний опір крайніх стержнів в 3 ... 4 рази перевищує їхній активний опір. Наприклад, для ГГ, що розглядається, активний опір крайнього стержня складає 0,00031 Ом, а індуктивний – 0,00087 Ом. Тому для зменшення струмів в крайніх стержнях доцільно збільшувати їхній індуктивний опір, а для зменшення втрат – зменшувати активний опір.

Як показали результати моделювання, на значення індуктивного опору стержня суттєво впливає наявність шліців між каналом, в якому знаходиться стержень, і поверхнею полюса. Наявність шліца шириною 2...3 мм зменшує магнітну провідність для потоків розсіювання, що замикаються навколо стержня і, як наслідок, зменшує його власний індуктивний опір. Тому для збільшення індуктивного опору крайніх стержнів доцільно шліци для них не виконувати, а для усіх інших – виконувати шліци шириною 2...3 мм. Але, як показав аналіз електромагнітного поля у полюсі, може виникати суттєве магнітне насичення феромагнітної перемички між каналом і поверхнею полюса. Тому для компенсації цього ефекту необхідно крайній стержень занурити глибше у полюс для збільшення товщини перемички “канал – поверхня полюса”. Розрахунки показали, що у порівнянні з іншими стержнями товщину перемички необхідно збільшити у 2...2,5 рази.

Для зменшення активного опору крайніх стержнів їх можна виконувати зі збільшеним діаметром або з матеріалу з підвищеною електропровідністю. Розрахунки показали, що оптимізація електричних параметрів крайніх стержнів дозволяє додатково зменшити струми в них у порівнянні з базо-

вим варіантом у 1,1...1,2 рази, а втрати потужності – відповідно у 1,2...1,4 разів, що в цілому сприяє підвищенню стійкості ДС.

Представлені результати моделювання виконані за наявності радіального статичного ексцентриситету ротора при циліндричних формах осердь статора і ротора ГГ. В дійсності конфігурація повітряного проміжку уздовж довжини розточки статора може бути значно складнішою внаслідок втрати циліндричності осердь, а ексцентриситет ротора може бути не лише радіальний, але й кутовий – з нахилом поздовжньої осі ротора до поздовжньої осі статора. Але, як показав додатковий аналіз, і в таких випадках отримані результати є справедливими.

Слід зазначити, що при проектуванні ГГ необхідна також розробка та впровадження спеціальних конструктивних рішень, які забезпечують надійність кріплення стержнів та КЗ сегментів на полюсі в умовах термомеханічних деформацій ДС ротора ГГ.

Висновки. 1. Результати математичного моделювання електромагнітних процесів в ДС ГГ дозволили виявити та узагальнити дві основні причини підвищеної пошкоджуваності ДС при наявності нерівномірного повітряного проміжку ГГ. Однією з причин є протікання в стержнях ДС у синхронних режимах роботи ГГ великих струмів, які нерівномірно розподілені між стержнями і спричиняють нерівномірний нагрів та термомеханічну деформацію ДС. Інша причина полягає в тому, що на стержні ДС діють великі за амплітудою пульсуючі електромагнітні сили, які поступово “розхитують” ДС, прискорюючи її ушкодження, причому найбільші за амплітудами струми і сили виникають у крайніх стержнях полюсів ДС.

2. Науково обґрунтовано способи виконання оптимальної конструкції ДС ГГ, в якій мінімізовано зазначені негативні фізичні процеси і яка є стійкою до появи нерівномірності повітряного проміжку ГГ.

1. *Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.* Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Высшая школа, 2001. – 390 с.
2. *Васьковський Ю.М.* Польовий аналіз електричних машин. – Київ, НТУУ «КПІ», 2007. – 191 с.
3. *Поташич С.І., Васьковський Ю.М., Федоренко Г.М.* Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності функціонування демпферних систем потужних гідрогенераторів // Гідроенергетика України. – 2009. – № 4. – С. 28–34.
4. *Liang Yan-ping, Yao Qing-shuang.* Analysis and calculation of electromagnetic force on damper windings for 1000 MW hydro-generator // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 20-23 Aug., 2011. – Pp. 1–6.
5. *Keller S., Xuan M.T., Simond J.J.* Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions // Electric Power Appl. – 2007. – № 1(5). – Pp. 657–664.
6. *Traxler-Samek G., Lugand T., Schwery A.* Additional losses in damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions // IEEE Trans on Indust. Elect. – 2010. – Vol. 57. – No.1. – Pp. 154–160.
7. *Wallin M., Bladh J., Lundin U.* Damper winding influence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity // IEEE Trans on Magnetics. – 2013. – Vol. 49. – No. 9. – Pp. 5158–5165.
8. *Wallin M.* Measurement and modelling of unbalanced magnetic pull in hydropower generators / Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1029. – 2013. – 51 p.

УДК 621.313.17

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЕ РОТОРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Ю.Н.Васьковский¹, докт.техн.наук, С.С.Цивинский², А.И.Титко¹, чл.-корр. НАН Украины

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

² – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

e-mail: yun157@gmail.com

При длительной эксплуатации мощных гидрогенераторов возникает неравномерность зазора между статором и ротором, в результате чего в полюсах ротора возникают пульсации магнитного потока, а в стержнях демпферной системы протекают индуцированные токи. Распределение токов между стержнями неравномерно, что вызывает термомеханические деформации демпферной системы и пульсирующие электромагнит-

ные силы, действующие на ее стержни. Поскольку известные меры по поддержанию равномерности зазора недостаточно эффективны, необходимо усовершенствование демпферных систем для повышения их устойчивости. Разработана новая математическая модель, проанализированы физические процессы и установлены основные причины повышенной повреждаемости демпферной системы при наличии эксцентриситета ротора. Предложен ряд технических решений, которые существенно уменьшают термомеханические деформации и пульсирующие силы в стержнях ротора. Библиографический список: 6, рис. 5.

Ключевые слова: гидрогенератор, демпферная система ротора, эксцентриситет ротора, полевая математическая модель.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE DAMPER WINDING OF HYDRO GENERATOR WITH ECCENTRICITY OF AIR GAP

Yu.M.Vaskovskiy¹, S.S.Tsyvinskyi², O.I.Tytko¹

¹ - Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

² - National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

e-mail: yun157@gmail.com

With prolonged use of powerful hydro generators appears uneven air gap between the stator and rotor. It resulting in pulsation of the magnetic flux in the rotor poles, and in the rotor bars flow induced currents. The distribution of induced current between the rods is uneven. It's causing extensive thermo mechanical deformations of the rods and appears pulsating electromagnetic forces, acting on rods. Known technical measures for maintaining uniformity of air gap in hydro generators are not effective. Therefore it is necessary improvements of the system rods of rotor of hydro generators to enhance its resilience. A new mathematical model was worked, the physical processes were analyzed and the main causes of damage of the rotor damper system with the presence of the rotor eccentricity were researched. A number of technical solutions for significantly reducing the negative thermo mechanical deformations and pulsating forces in the rotor rods was proposed. References 6, figures 5.

Key words: powerful hydro generator, damping system of the rotor, eccentricity of the rotor, field mathematical model.

1. Abramov A.I., Ivanov-Smolenskiy A.V. Designing of hydraulic generators and synchronous condensers. – Moskva:Vysshaya shkola, 2001. – 390 p. (Rus)
2. Vaskovskiy Yu.M. Field analysis of electric machines. – Kyiv, Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet "Kyivskiy Politekhichnyi Instytut", 2007. – 191 p. (Ukr)
3. Potashnyk S.I., Vaskovskiy Yu.M., Fedorenko G.M. Improving the reliability, safety and efficiency of the rotor damper of powerful hydro generator // Hidroenerhetyka Ukrainy. – 2009. – № 4. – Pp. 28–34. (Ukr)
4. Liang Yan-ping, Yao Qing-shuang Analysis and calculation of electromagnetic force on damper windings for 1000MW hydro-generator // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 20-23 Aug. 2011. – Pp. 1–6.
5. Keller S., Xuan M.T., Simond J.J. Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions // Electric Power Appl. – 2007. – No. 1(5). – Pp. 657–664.
6. Traxler-Samek G., Lugand T., Schwery A. Additional losses in damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions // IEEE Trans on Indust. Elect. – 2010. – Vol. 57. – No. 1. – Pp. 154–160.
7. Wallin M., Bladh J., Lundin U. Damper winding influence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity // IEEE Trans on Magnetics. – 2013. – Vol. 49. – No. 9. – Pp. 5158–5165.
8. Wallin M. Measurement and modelling of unbalanced magnetic pull in hydropower generators. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1029. – 2013. – 51 p.

Надійшла 01.04.2014