

ЗОВНІШНЯ ДЕМПФЕРНА СИСТЕМА РОТОРА ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

Ю.М. Васьковський*, докт. техн. наук, **К.М. Татарінов**
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: yun157@gmail.com, tarantino@gmail.com

Методами математичного моделювання проведено порівняльний аналіз характеристик явнополюсної синхронної машини для двох варіантів конструкції демпферної системи ротора. В першому варіанті використовується традиційна (внутрішня) демпферна система ротора, що виконується з електропровідних стрижнів, занурених в поверхню полюсів. В другому варіанті зовнішня демпферна система ротора виконується у вигляді електропровідних листів, закріплених на поверхні полюсів. Відмічено, що зовнішня демпферна система ротора забезпечує кращі асинхронні характеристики і характеризується більш рівномірним нагрівом, що зменшує термомеханічні навантаження елементів конструкції. Така конструкція підвищує надійність машини не тільки у разі виникнення короткочасних асинхронних режимів роботи, але й у разі появи нерівномірності повітряного проміжку між статором і ротором, який зазвичай виникає в процесі тривалої експлуатації потужних явнополюсних синхронних машин, наприклад, гідрогенераторів. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: явнополюсна синхронна машина, демпферна система ротора, асинхронний режим, ексцентриситет ротора, температура і термомеханічні напруження.

Постановка задачі. Традиційна конструкція демпферної системи ротора (ДСР) явнополюсної синхронної машини (ЯСМ) виконується по типу короткозамкненої “білячої клітки” і складається з занурених в полюсні наконечники електропровідних стрижнів, з’єднаних між собою на торцях полюсів коротко замикаючими сегментами. Такі системи на окремих полюсах можуть з’єднуватися міжполюсними з’єднаннями, утворюючи суцільну демпферну обмотку ротора. Таку обмотку будемо називати внутрішньою демпферною системою (ВДС) ротора.

Вважається, що така конструкція є досить простою і надійною та за правильного вибору параметрів стрижнів забезпечує задані асинхронні характеристики ЯСМ. Але останнім часом в потужних ЯСМ спостерігається збільшення числа випадків ушкодження конструкції ДСР зі значними техніко-економічними втратами. Відірвані елементи ДСР – стрижні або торцеві короткозамикаючі сегменти під дією відцентрових сил зміщуються в повітряний проміжок та ушкоджують конструкцію статора. Ці випадки зокрема спостерігаються в потужних ЯСМ, наприклад, гідрогенераторах (ГГ) [1].

Збільшення таких аварій пов’язують з поступовою деградацією ДСР внаслідок тривалої експлуатації ЯСМ й відпрацюванням гарантійних термінів їхньої роботи, зокрема, з появою ексцентриситету ротора. ЯСМ є тихохідними синхронними машинами, які характеризуються великим діаметром ротора і відносно невеликим повітряним проміжком між статором і ротором. Наприклад, в потужних ГГ відношення висоти повітряного проміжку до діаметру розтки статора складає усього 0,1...0,3%. Так в ГГ типу СВ 1230/140 - 56 потужністю 130,6 МВА діаметр розтки 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 появу в процесі тривалої експлуатації ГГ нерівномірності повітряного проміжку уздовж кола розтки 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 повітряного проміжку ГГ не є достатньо ефективними.

Як наслідок нерівномірності повітряного проміжку під час обертання ротора в його полюсах виникають пульсації основного магнітного потоку. В свою чергу пульсації потоку призводять до появи ЕРС і струмів, які замикаються в стрижнях ДСР. Очевидно, що виникнення цих струмів не

пов'язано з роботою ЯСМ в асинхронних і несиметричних режимах, а обумовлено виключно появою дефектів в ЯСМ, що призводять до порушення рівномірності повітряного проміжку. Зазначене явище було детально досліджено в роботах [2, 3], а також розглядалося в роботах іноземних авторів [4 – 9]. Доведено, що хоча частота пульсацій (1...2 Гц) і величина ЕРС є невеликими, але внаслідок малого опору ДСР величини струмів сягають небезпечних значень і протікають вони тривало. Розподіл струмів між різними стрижнями ДСР і відповідний їхній нагрів є дуже нерівномірним [2, 7], що призводить до значних внутрішніх термомеханічних деформацій в ДСР та подальшого її ушкодження. Слід підкреслити, що в існуючих ЯСМ конструкція ДСР створювалася без урахування наслідків появи нерівномірності повітряного проміжку. Тому існує нагальна потреба в подальшому удосконаленні ДСР, зокрема введенні на етапі проектування в їхню конструкцію певних технічних рішень, що забезпечують стійкість ДСР до нерівномірності повітряного проміжку.

Одним з ефективних технічних рішень є застосування на роторі ЯСМ зовнішньої демпферної системи (ЗДС). Ідею ЗДС ротора синхронної машини було запропоновано на прикладі турбогенератора нового типу – синхронно-асинхронного турбогенератора (САТ) з покращеними асинхронними характеристиками [10].

ЗДС ротора САТ є конструкцією, яка концентрично охоплює бочку ротора турбогенератора по всій зовнішній поверхні і в поперечному перерізі зображена на рис. 1. Ця конструкція влаштована

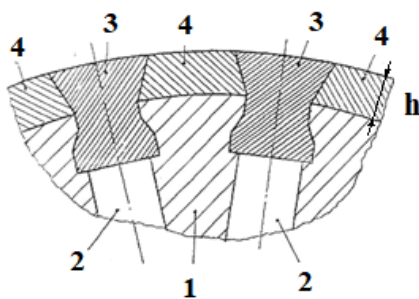


Рис. 1

в такий спосіб. Поверхня масивного ротора містить феромагнітні зубці 1 і пази 2 з обмоткою збудження. Пази ротора закриваються фігурними клинами 3, які спираються на плечики зубців. Фігурні клини виконані з немагнітного електропровідного матеріалу та мають фігурні гребінці, що виступають над поверхнею ротора на висоту h . При цьому ширина клинових гребінців більша, ніж ширина пазів ротора. Простір між фігурними клинами щільно заповнюють вставками 4, також виконаними з немагнітного матеріалу з високою електропровідністю. Фігурні клини виконують такі функції: утримують у пазах 2 обмотку збудження турбогенератора; утримують вставки 4; створюють разом із вставками на поверхні ротора єдиний короткозамкнений електропровідний шар для

поліпшення параметрів турбогенераторів в асинхронних режимах роботи.

У своїй сукупності елементи описаної конструкції утворюють симетричну демпферну систему ротора. У синхронному режимі САТ "не відчуває" наявності демпферної системи, оскільки її виконано з немагнітних матеріалів, що мають таку ж магнітну проникність, як і повітряний проміжок. При цьому генератор має оптимальні значення синхронних індуктивних опорів X_d , X_q і достатній запас статичної та динамічної стійкості і може тривало працювати в синхронному режимі. У разі асинхронного режиму в ЗДС індуються вихрові струми. Оскільки ЗДС має більший діаметр у порівнянні з діаметром масивного ротора, то у разі переходу до асинхронного режиму спостерігається відносно "зменшення повітряного проміжку" турбогенератора. Це веде до підвищення коефіцієнта потужності. Під час переходу в асинхронний режим розглянутий САТ розвиває на 15...20% більший асинхронний момент за меншого в 1,5...1,7 разів ковзання, ніж за традиційної конструкції ротора синхронного турбогенератора.

Таким чином, дана конструкція реалізує ідею "регульованого повітряного проміжку" генератора, який автоматично змінюється в залежності від режиму його роботи. ЗДС суттєво зменшує

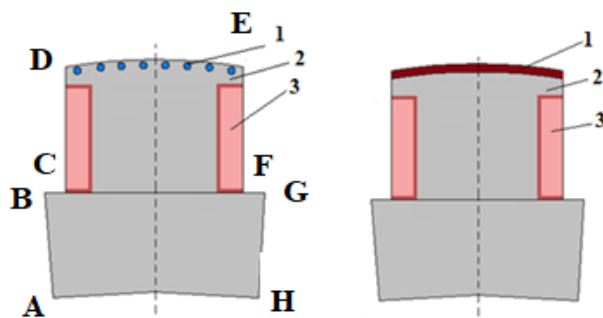


Рис. 2

втраги та нагрівання ротора у несиметричних режимах роботи, в яких ЗДС екранує струми частоти 100 Гц, що індуються в роторних контурах. Важливим параметром, що характеризує ЗДС, є її висота. Оскільки сучасні потужні турбогенератори мають досить великий запас по висоті проміжку, встановлення ЗДС не ускладнює технологічних операцій із вставці ротора в статор.

Зазначена ідея виконання демпферної системи ротора може бути перенесена на конструкцію демпферних систем ротора потужних ГГ. На рис. 2 показано два варіанти конструкції полюса

ГГ: лівий – ВДС, правий – ЗДС. ВДС виконується у вигляді окремих стрижнів 1, занурених у поверхню полюса 2, на якому розташовано обмотку збудження 3. ЗДС являє собою виконаний з міді суцільний лист 1 висотою h , накладений і закріплений на поверхні полюса 2 з обмоткою збудження 3. При цьому потрібно обґрунтувати доцільний вибір висоти ЗДС з точки зору вимог до її асинхронних характеристик і обмежень щодо мінімально допустимої технологічної висоти повітряного проміжку

Очікувані переваги ЗДС у порівнянні з внутрішньою ВДС є наступними:

1) з огляду на майже рівномірний нагрів елементів ЗДС, відсутні значні локальні термомеханічні напруження, які спричиняють поступову її деградацію і ушкодження;

2) внаслідок “зменшення” повітряного проміжку між статором і ротором збільшується асинхронний електромагнітний момент в асинхронному режимі роботи ГГ і за коливань швидкості ротора, що підвищує стабілізуючу дію демпферної системи. При цьому в синхронному режимі роботи ГГ зберігає незмінним синхронні індуктивні опори і розрахункові синхронні характеристики;

3) також внаслідок “зменшення” повітряного проміжку зростає $\cos(\varphi)$ в асинхронному режимі роботи ГГ, що зменшує реактивну складову струму обмотки статора та її нагрів. Це сприяє збільшенню допустимого часу роботи ГГ в асинхронному режимі, який у даний час обмежується вимогами інструкцій по експлуатації ГГ величиною 15 с;

4) суцільний електропровідний масив ЗДС на поверхні полюса виконує екрануючі функції, захищаючи обмотку збудження і внутрішню конструкцію полюса від негативного впливу струмів частоти 100 Гц в несиметричних режимах роботи ГГ та від пульсацій зубцевих гармонік магнітного поля, викликаних зубцями статора.

Метою роботи є порівняльний аналіз характеристик ЗДС з аналогічною по параметрам ВДС та перевірка зазначених вище очікуваних переваг ЗДС.

Математична модель. Під час дослідження фізичних процесів в ЗДС і ВДС електромагнітне і температурне поле аналізуються у двовимірному наближенні у поперечному перерізі активної зони. Мету досліджень можна досягнути з врахуванням періодичного характеру розподілу поля вздовж повітряного проміжку під час використання розрахункової області, яка містить одну пару полюсів. При цьому вважається, що окремі полюси ротора з'єднані між собою торцевими міжполюсними елементами, утворюючи суцільну короткозамкнену систему ротора. Аналіз поля ведеться для сталого асинхронного обертання ротора за наявності ковзання s . Оскільки осердя статора і ротора виконані шихтованими, впливом вихрових струмів в тонких листах шихтовки на розподіл поля можна знехтувати. Електромагнітне поле в межах поперечного перерізу ЯСМ відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу описується в декартових координатах наступним квазістаціонарним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{zcm} \quad , \quad (1)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму статора; s – ковзання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; J_{zcm} – густина сторонніх струмів (густина струмів в пазах статора, які задаються у відповідності до схеми обмотки, густина струмів в обмотці збудження). Величина μ в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні магнітопроводи, визначається під час чисельного розв'язання рівняння (1) ітераційним методом за заданими кривими намагнічування. Електропровідність задається тільки в елементах демпферної системи ротора – в пазах, в яких розташовано електропровідні стержні ВДС або в зоні електропровідного листа ЗДС. Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але при цьому в пазах задається стороння густина струмів, яка для різних фаз задається формулами

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} / S_{\Pi} \quad , \\ \dot{J}_{B \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi} \quad , \\ \dot{J}_{C \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi} \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_{Π} – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора; S_{Π} – площа перерізу паза статора. Постійні струми в обмотці збудження 3 відсутні, оскільки

в асинхронних режимах потужних ГГ обмотка збудження зазвичай відключається (за наявності струму збудження в асинхронному режимі спостерігаються великі коливання струму обмотки статора і електромагнітного моменту ГГ). Також треба підкреслити, що умова відсутності струму збудження в обмотці 3 приймається однаковою для обох варіантів ДСР, що розглядаються, що у цілому не впливає на результати порівняльного аналізу асинхронних та інших характеристик ГГ.

Рівняння (2) доповнюється граничними умовами – значенням векторного магнітного потенціалу на границях розрахункової області. На зовнішніх границях осердь статора і ротора G_1 і G_2 зазвичай задаються однорідні граничні умови першого роду, що означає припущення щодо відсутності магнітних потоків розсіювання через зазначені границі розрахункової області

$$A|_{G_1} = A|_{G_2} = 0. \quad (3)$$

На бокових границях розрахункової області G_3 і G_4 задаються умови періодичності

$$A|_{G_3} = A|_{G_4}. \quad (4)$$

Індукована в електропровідних елементах ротора густина струму визначається на підставі першого рівняння Максвелла наступним виразом:

$$\dot{J}_z = (\partial \dot{B}_y / \partial x - \partial \dot{B}_x / \partial y) / \mu_0, \quad (5)$$

де складові магнітної індукції знаходяться після розрахунку векторного магнітного потенціалу $\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y$, $\dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x$.

Електромагнітний момент визначається як добуток тангенціальної (дотичної до поверхні) складової електромагнітної сили, що прикладена до поверхні ротора, на плече сили – радіус ротора R_2 . Повний електромагнітний момент між статором і ротором за допомогою тензора магнітного натягу визначається наступною формулою:

$$M_{EM} = 2 \cdot p \cdot F_\tau \cdot R_2 = \frac{2 \cdot p \cdot R_2 \cdot l_{II}}{\mu_0} \cdot \int_0^\tau B_n \cdot B_\tau \cdot dl, \quad (6)$$

де p , τ , l_{II} – число пар полюсів, полюсна поділлка і активна довжина ротора; B_n , B_τ – нормальна (направлена уздовж вектора нормалі до поверхні ротора) та тангенціальна (направлена уздовж вектора дотичної до поверхні ротора) складові вектора магнітної індукції. Диференційне рівняння для розрахунку нестационарного температурного поля T в полюсі ГГ в декартових координатах має наступний вигляд:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_V, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; c – теплоємність; ρ – питома густина; Q_V – сумарні питомі об'ємні втрати, які складаються з питомих об'ємних втрат в обмотці збудження, демпферній обмотці та додаткових втрат на поверхні полюсу від вищих гармонік магнітного поля в проміжку.

Початковими умовами є однорідний розподіл температури в полюсі, що дорівнює температурі навколишнього середовища (прийнято $T_0 = 40^\circ\text{C}$). Розподіл температури є однакоим для кожного полюсу ГГ, що дає змогу розглядати теплову задачу в межах одного полюсу. Такий підхід до аналізу температурного поля достатній для проведення порівняльного аналізу нагріву ВДС і ЗДС.

Під час завдання на зовнішніх контурах полюсу граничних умов необхідно урахувати особливості системи вентиляції ГГ, для якої можна вважати, що теплообмін між охолоджуючим повітрям і поверхнями полюса вздовж контуру $BCDEFG$ (рис. 2) відповідає закону Ньютона – Ріхмана, тобто на цьому контурі можна задати граничну умову третього роду

$$\partial T / \partial n = -\alpha \lambda^{-1} (T - T_0), \quad (8)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі. Така ж умова третього роду задається на внутрішньому контурі AH ярма ротора. На поверхнях AB , GH задаються граничні умови другого роду

$$\partial T / \partial n = 0, \quad (9)$$

які характеризують відсутність теплообміну між сусідніми полюсами через ярмо ротора із-за симетрії розподілу температури в сусідніх полюсах. Коефіцієнти λ і α визначаються по довідковим літературним даним. Математична модель (1) – (9) реалізується чисельно методом скінченних елементів. **Об’єкт досліджень.** Дослідження проводяться на прикладі ГГ типу СВ 1230/140–56, який має

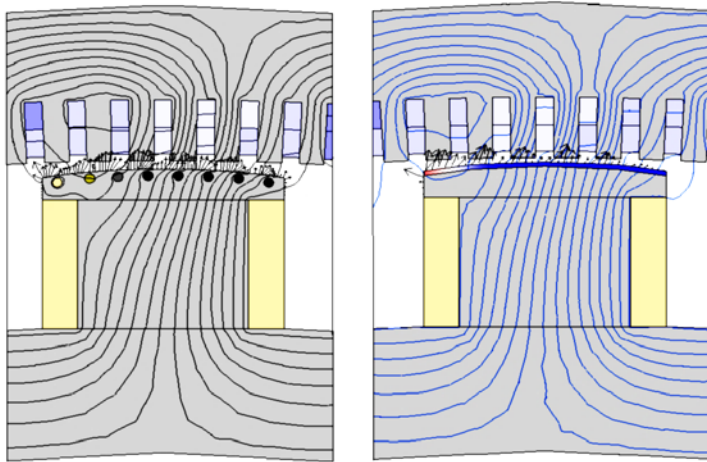


Рис. 3

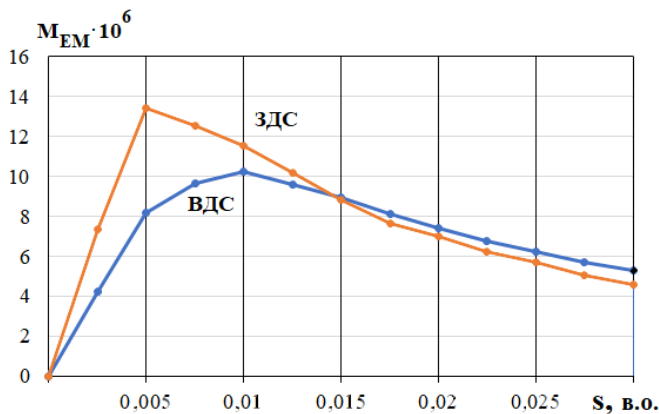


Рис. 4

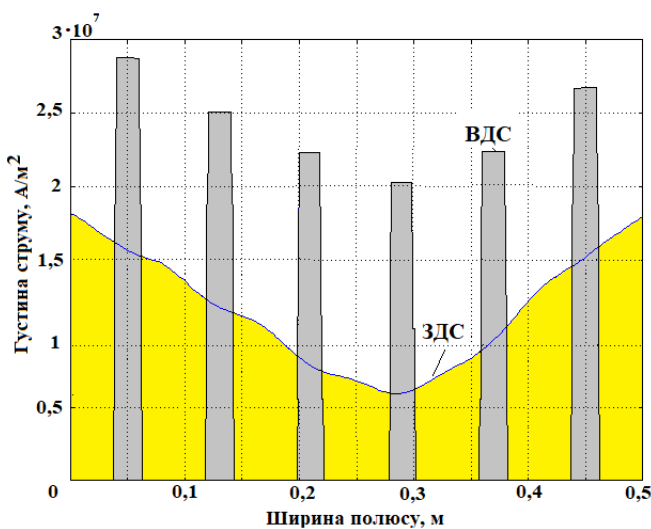


Рис. 5

наступні вихідні дані. Повна потужність 130,6 МВА; лінійна номінальна напруга 13,8 кВ; номінальний фазний струм 5,465 кА; $\cos(\varphi) = 0,85$; ККД = 0,979; число полюсів 56; діаметр розточки статора 11600 мм; повітряний проміжок 20 мм; число пазів статора 420; активна довжина статора 1400 мм; число стрижнів ВДС на одному полюсі ротора 8; діаметр стрижня 20 мм; висота полюса 290 мм; висота полюсного башмака 50 мм. Коефіцієнт тепловіддачі між повітрям і осердям полюсів 214 Вт/(м²°С), коефіцієнти теплопровідності сталі осердя полюсів 47 і міді стрижнів 384 Вт/(м°С).

Під час проектування ЗДС у першому наближенні висота мідного листа на поверхні полюсу h вибирається з умови *однаковості* сумарної площі перерізу усіх стрижнів відповідної ВДС і площі суцільного мідного електропровідного листа: $nS_{стр} = hb_p$, тобто $h = nS_{стр} / b_p$, де n – число стрижнів на полюсі; $S_{стр}$ – площа одного стрижня ВДС; b_p – ширина полюсу. Для даного ГГ отримаємо $h = 7$ мм. В результаті проміжок між полюсами ротора і розточкою статора “у світлі” дорівнює 13 мм. Допустимість прийняття такого проміжку потрібно обґрунтувати з огляду на особливості конструкції і експлуатації ГГ у цілому.

Результати дослідження. 1. Асинхронний режим. На рис. 3 показано розподіл поля в варіантах полюса ГГ, що мають ВДС і ЗДС в асинхронному режимі за ковзання ротора $s = 0,01$ в.о. і відсутності струму в обмотці збудження. Стрілками показано напрям вектора магнітного натягу (6).

На рис. 4 показано залежності електромагнітного асинхронного моменту ГГ від ковзання для двох зазначених варіантів виконання демпферної системи. Величини струму обмотки статора в обох варіантах для кожного ковзання є однаковими. Рис. 4 відображає кращі асинхронні характеристики ГГ у разі використання ЗДС у порівнянні з традиційним варіантом ВДС. Зокрема, максимальний момент ЗДС в 1,31 рази більше, ніж в ВДС. В діапазоні малих ковзань 0...0,015 в.о. момент ЗДС перевищує мо-

мент ВДС, а надалі вони практично зрівнюються. Але слід зауважити, що ковзання більше ніж 0,015 в.о. в ГГ даної потужності практично не відбувається.

На рис. 5 зображено дискретний розподіл густини струму в стрижнях ВДС і неперервний розподіл густини струму по ширині полюсу в ЗДС за ковзання $s = 0,01$ в.о. Максимальна густина струму в крайніх стрижнях ВДС суттєво (в 1,6 разів) більша, ніж на краях ЗДС. Втрати в крайніх стрижнях ВДС в 2,38 разів більші, ніж втрати в центральних стрижнях. При цьому сталий перепад температури між крайніми і центральними стрижнями дорівнює $\Delta T = 38^\circ\text{C}$, що призводить до різних теплових розширень довжини окремих стрижнів $\Delta L = \alpha_L \cdot L \cdot \Delta T$, (α_L – коефіцієнт лінійного розширення; L – довжина стрижня) і до значних несиметричних термомеханічних напружень на ділянках з'єднань стрижнів з торцевими коротко замикаючими сегментами [3]. На відміну від ВДС в ЗДС внаслідок суттєво кращого теплообміну між різними ділянками суцільного шару ЗДС і кращими умовами його охолодження перепад сталої температури по ширині ЗДС складає усього 7°C і тому неприпустимі термомеханічні напруження в листі ЗДС не виникають.

Таким чином, ЗДС у порівнянні з ВДС за рівних інших умов не тільки надає можливість більш тривалої роботи ГГ в короткочасному асинхронному режимі (до усунення причин появи асинхронного режиму), але й при цьому забезпечує більш рівномірний нагрів і більшу надійність функціонування конструкції демпферної системи ротора.

2. Наявність ексцентриситету ротора. Як відмічалось вище, у разі обертання ротора в нерівномірному повітряному проміжку ГГ, наприклад, під час появи статичного ексцентриситету (СЕ) ротора, внаслідок пульсацій основного магнітного потоку в синхронному режимі роботи ГГ в демпферній системі ротора постійно протікають струми [2, 4, 6]. Величина СЕ ротора характеризується коефіцієнтом відносного ексцентриситету, що описується формулою

$$\varepsilon = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) (\delta_{\max} + \delta_{\min})^{-1},$$

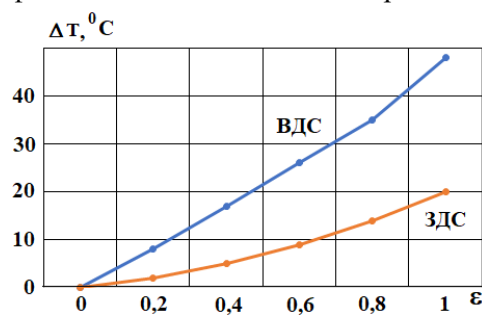


Рис. 6

де $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ – максимальна і мінімальна величини повітряного проміжку відповідно. Коефіцієнт ε змінюється в межах від 0 ($\delta_{\max} = \delta_{\min}$ – відсутність ексцентриситету) до $\varepsilon = 1$. На рис. 6 показано залежність максимального перепаду температури між стрижнями ВДС або окремими ділянками листа ЗДС від величини СЕ ε за ковзання $s=0$ (синхронному обертанні ротора ГГ). Отримані результати засвідчують суттєво меншу нерівномірність нагріву окремих частин ЗДС у порівнянні з ВДС для широкого діапазону значень СЕ, що підтверджує

більшу термомеханічну стійкість і надійність ЗДС у випадку виникнення нерівномірності повітряного проміжку ГГ.

Очевидно, що застосування ЗДС ротора в ЯСМ призводить до зменшення фактичного повітряного проміжку між статором і ротором (проміжок у “світлі”) у порівнянні з аналогічною за параметрами ЯСМ з ВДС ротора. Це потребує певного конструктивно-технологічного аналізу можливості впровадження ЗДС в конкретній ЯСМ. Але можливе використання різних конструктивних рішень для вирішення цієї проблеми. Наприклад, можливе невелике збільшення немагнітного проміжку ЯСМ за одночасного збільшення струму (або числа витків) обмотки збудження задля забезпечення номінальної величини магнітного потоку збудження. Або збільшення повітряного проміжку у “світлі” ЯСМ можливе за рахунок певного зменшення висоти h суцільного листа ЗДС шляхом виконання на внутрішній оберненій до полюсу поверхні листа невеликих виступів, які закріплюються у відповідні виконані на поверхні полюсів пази, чим забезпечується необхідна сумарна площа поперечного перерізу ЗДС, тощо.

Висновки. Отримані результати математичного моделювання підтверджують переваги ЗДС у порівнянні з традиційною ВДС ротора як з точки зору покращення асинхронних характеристик ГГ за короткочасної роботи в асинхронному режимі, так і з точки зору підвищення надійності функціонування демпферної системи за рахунок більш рівномірного її нагріву. Такі особливості ЗДС особливо корисні в умовах виникнення нерівномірності повітряного проміжку ротора, яка з різних причин з'являється внаслідок тривалої експлуатації ЯСМ, оскільки при цьому суттєво зменшуються нерівномірні термомеханічні напруження в демпферній системі ротора, які є однією з головних причин її деградації та ушкодження.

1. Артюх С.Ф., Урманов О.Б. Статистический анализ отказов электрооборудования на гидроэлектростанциях каскада киевских ГЭС-ГАЭС. *Вісник ХІІІ*. 2011. № 41. С. 3–7.
2. Васковський Ю.М., Цивінський С.С., Титко О.І. Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідрогенераторів при нерівномірності повітряного проміжку. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 1. С. 65–71.
3. Васковський Ю.М., Гераскін О.А. Вплив режимних і експлуатаційних факторів на демпферну систему ротора явнопольсної синхронної машини. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 2. С. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.047>
4. 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.
5. Traxler-Samek G., Lugand T., Schwery A. Additional losses in damper winding of large hydrogenators at open-circuit and load conditions. *IEEE Trans on Indust. Elect.* 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 154–160.
6. 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.
7. Hongbo Qiu, Xiaobin Fan, Ran Yi, Jianqin Feng, Jie Wu, Cunxiang Yang, Haiyang Zhao. Eddy current density asymmetric distribution of damper bars in bulb tubular turbine generator. *Archives of Electrical Engineering*. 2017. Vol. 66(3). Pp. 571–581.
8. Ehya H., Nysveen A., Nilssen R., Liu Y. Static and dynamic eccentricity fault diagnosis of large salient pole synchronous generators by means of external magnetic field. *IET Electric Power Applications*. 2021. Pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12068>
9. Rahimian M., Butler-Purry K. Modeling of synchronous machines with damper windings for condition monitoring. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, Florida, USA, 3-6 May 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075264>
10. Титко А.И., Васковський Ю.Н. Синхронно-асинхронные турбогенераторы. Київ: Наукова думка, 2010. 248 с.

EXTERNAL DAMPER SYSTEM OF THE SALIENT POLE SYNCHRONOUS MACHINE

Yu.M. Vaskovsky, K.M. Tatarinov

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: yun157@gmail.com, tarantino@gmail.com

A comparative analysis of the characteristics of the salient pole synchronous machine for two variants of the rotor damping system design was performed by mathematical modeling methods. In the first embodiment, a traditional (internal) damping rotor system is used, which is made of electrically conductive rods immersed in the surface of the poles. In the second embodiment, the external damping system of the rotor is made in the form of conductive sheets fixed to the surface of the poles. It is noted that the external damping system of the rotor provides better asynchronous characteristics and is characterized by more uniform heating, which reduces the thermomechanical loads of structural elements. This design increases the reliability of the machine not only in the event of short-term asynchronous modes of operation, but also in the event of uneven air gap between the stator and rotor, which usually occurs during long operation of high-pole synchronous machines, such as hydro generators. References 10, figures 6.

Keywords: salient pole synchronous machine, rotor damping system, asynchronous mode, rotor eccentricity, temperature and thermomechanical stresses.

1. Artyukh S.F., Urmanov O.B. Statistical analysis of electrical equipment failures at hydroelectric power stations of the Kiev HPP-PSP cascade. *Bulletin of the KhPI*. 2011. No 41. Pp. 3–7. (Rus)
2. Vaskovsky Yu.M., Tsyvinsky S.S., Titko O.I. Electromagnetic processes in the damper system of rotors of hydrogenators with uneven air gap. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 1. Pp. 65–71. (Ukr)
3. Vaskovsky Yu.M., Geraskin O.A. Influence of mode and operational factors on the damping system of the rotor of an open-pole synchronous machine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 2. Pp. 47–56. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.047>
4. 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.
5. Traxler-Samek G., Lugand T., Schwery A. Additional losses in damper winding of large hydrogenators at open-circuit and load conditions. *IEEE Trans on Indust. Elect.* 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 154–160.
6. 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.
7. Hongbo Qiu, Xiaobin Fan, Ran Yi, Jianqin Feng, Jie Wu, Cunxiang Yang, Haiyang Zhao. Eddy current density asymmetric distribution of damper bars in bulb tubular turbine generator. *Archives of Electrical Engineering*. 2017. Vol. 66(3). Pp. 571–581.
8. Ehya H., Nysveen A., Nilssen R., Liu Y. Static and dynamic eccentricity fault diagnosis of large salient pole synchronous generators by means of external magnetic field. *IET Electric Power Applications*. 2021. Pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12068>
9. Rahimian M., Butler-Purry K. Modeling of synchronous machines with damper windings for condition monitoring. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, Florida, USA, 3-6 May 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075264>
10. Titko O.I., Vaskovsky Yu.M. Synchronous-asynchronous turbogenerators. Kyiv: Naukova Dumka, 2010. 248 p. (Rus)

Надійшла 25.04.2022

Остаточний варіант 11.08.2022