

ВПЛИВ РЕЖИМНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ДЕМПФЕРНУ СИСТЕМУ РОТОРА ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

Ю.М. Васьковський*, докт.техн.наук, **О.А. Гераскін****, канд.техн.наук
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: vun157@gmail.com, nirbikalpasamadhi@ukr.net

Досліджено фізичні процеси в демпферній системі ротора явнополюсної синхронної машини, які викликають поступову руйнацію її конструкції. Зокрема, досліджено розподіли струмів, температури і термомеханічних напружень в стрижнях демпферної системи у разі її роботи в асинхронному і несиметричному режимах, а також появи ексцентриситету ротора. Розроблено польову математичну модель, що враховує спільну дію трьох фізичних полів різної природи: електромагнітного, температурного і поля термомеханічних напружень, і дає змогу оцінити нагрів і термомеханічні навантаження в демпферній системі ротора явнополюсної синхронної машини. За результатами аналізу визначено нагрів і термомеханічні навантаження елементів конструкції й надано рекомендації щодо її конструктивного удосконалення. Бібл. 9, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: явнополюсна синхронна машина, демпферна система, асинхронний і несиметричний режими, температура, термомеханічні напруження і деформації.

Вступ. Демпферна система ротора (ДСР) явнополюсної синхронної машини (ЯСМ) виконує важливі експлуатаційні функції щодо утримання ЯСМ в синхронному режимі роботи у разі виникнення раптових зовнішніх збурень: зміни напруги живлення або моменту навантаження на валу ротора, короткочасної втрати струму в обмотці збудження, тощо. Зокрема, ДСР ефективно гасить коливання швидкості ротора, що виникають внаслідок зазначених зовнішніх збурень, а також може забезпечувати короткочасну роботу ЯСМ в асинхронному режимі у випадку її раптового випадання з синхронного режиму роботи.

Вважається, що конструкція ДСР є досить простою і за правильного вибору параметрів струмонесучих стрижнів характеризується високою надійністю експлуатації. Але останнім часом в ЯСМ спостерігається збільшення числа випадків ушкодження та руйнації конструкції ДСР зі значними техніко-економічними втратами. Відірвані елементи конструкції ДСР – стрижні або торцеві короткозамикаючі елементи – під дією відцентрових сил зміщуються в повітряний проміжок і ушкоджують конструкцію статора. Ці випадки часто спостерігаються в потужних ЯСМ, наприклад, гідрогенераторах [1]. Зокрема, в гідрогенераторі потужністю 22,5 МВт Київської ГЕС мали місце випадки повної руйнації ДСР полюсів, а саме: відрив стержнів полюсу від короткозамикаючого кільця, а також тертя полюсів ротора об осердя статора внаслідок появи ексцентриситету ротора.

Збільшення таких аварій пов'язують з поступовою деградацією ДСР внаслідок тривалої експлуатації ЯСМ й відпрацюванням гарантійних термінів їхньої роботи. З огляду на старіння існуючого парку потужних електричних машин, які, однак, ще тривалий час будуть знаходитися в експлуатації, зазначена проблема набуває важливого практичного значення, потребує системного дослідження і розробки рекомендацій щодо удосконалення ДСР [2, 3, 8, 9].

В попередніх наукових працях авторів [2, 3] висунута гіпотеза, яка пов'язує поступову руйнацію ДСР з нерівномірним нагрівом її стрижнів. Було відмічено, що в процесі функціонування ДСР внаслідок різного лінійного температурного розширення окремих її стрижнів в торцевих короткозамикаючих елементах виникають несиметричні термомеханічні напруження, які набувають небезпеч-

них величин. Несиметричні термомеханічні напруження циклічно повторюються у пусках і зупинках ЯСМ, виникають в неномінальних режимах роботи і, як наслідок, призводять до втоми матеріалів і відриву стрижнів від торцевих короткозамикаючих елементів ДСР та її руйнації.

Задля комплексної оцінки впливу режимних і експлуатаційних факторів на зазначений деструктивний процес та отримання обґрунтованих висновків і рекомендацій щодо його запобігання важливо провести порівняльний аналіз дії зазначених факторів. Під режимними факторами мається на увазі робота ЯСМ в синхронному, асинхронному і несиметричному режимах за відсутності ушкоджень конструкції, а до експлуатаційних факторів можна віднести роботу ЯСМ за появи ушкоджень конструкції ротора, які виникли в процесі тривалої експлуатації ЯСМ і, перш за все, появи нерівномірного повітряного проміжку між статором і ротором, викликаного статичним ексцентриситетом (СЕ) ротора ЯСМ.

Метою роботи є виявлення та дослідження особливостей фізичних процесів в ДСР ЯСМ, які спричиняють деградацію їхніх конструкцій. Зокрема, досліджуються розподіли струмів, температури і термомеханічних напружень в стрижнях ДСР у разі роботи ЯСМ в асинхронному і несиметричному режимах, а також появи статичного ексцентриситету ротора. Дослідження виконуються методами математичного моделювання на основі польових математичних моделей.

Математична модель враховує спільну дію трьох фізичних полів різної природи: електромагнітного, температурного і поля термомеханічних напружень.

Електромагнітне поле в сталому режимі роботи в межах поперечного перерізу ЯСМ в декартових координатах відносно комплексної амплітуди осьової складової \dot{A}_z векторного магнітного потенціалу описується квазістационарним рівнянням

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\dot{A}_z\right)-j\omega_1 s \gamma \dot{A}_z = -\dot{J}_{zcm}, \quad (1)$$

$\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму статора; s – ковзання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; J_{zcm} – густина сторонніх струмів (в пазах статора і обмотці збудження). Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду $A_z|_G=0$ на лінії G зовнішньої поверхні ярма статора і дає змогу розрахувати поле машини в асинхронному і синхронному режимах роботи. В синхронному режимі приймається $s = 0$.

Задля чисельного розв'язання рівняння (1) використовується *метод багатопозиційних розрахунків* з урахуванням заданої швидкості обертання ротора [2, 4]. Для обраного інтервалу часу T , на якому аналізується електромагнітний процес, обирається крок по часу Δt і виконується серія розв'язків рівняння (1) поля з урахуванням зміни кутового положення ротора і величин струмів фаз статора, які відбуваються за час Δt . Тобто, у кожному з положень ротора розраховується сталий гармонійний електромагнітний процес. Після розрахунків достатньої кількості окремих задач за різних положень ротора і різних значеннях струму статора та їхнього об'єднання отримують шукані залежності як функції часу. Згідно зазначеного методу розрахунку для кожного поточного моменту часу $t_k = 0 \dots T$ в межах сформованої геометрії розрахункової області рівняння (1) розв'язується за відповідних цьому моменту часу величинах густини струмів фаз статора, які визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A_{ст}} &= J_m \cos \alpha_k, \\ \dot{J}_{B_{ст}} &= J_m [\cos(\alpha_k + 2\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 2\pi/3)], \\ \dot{J}_{C_{ст}} &= J_m [\cos(\alpha_k + 4\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 4\pi/3)], \end{aligned} \quad (2)$$

де $J_m = I_m u_{\Pi\Pi} / S_{\Pi\Pi}$ – амплітуда густини струму у фазах обмотки статора; $u_{\Pi\Pi}$ – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; $S_{\Pi\Pi}$ – площа перерізу паза статора; $\alpha_k = \omega_R t_k$, ω_R – кутова швидкість обертання ротора, $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 1, \dots, N$; N – кількість кроків по часу.

Величина μ в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається у процесі чисельного розв'язання рівняння (1) ітераційним методом за заданими кривими намагнічування. Електропровідність задається тільки в пазах полюсів ротора, в яких розташовані електропровідні стрижні ДСР. Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але при

цьому в пазах задається стороння густина струмів за формулами (2). Густина струмів в обмотках ротора J_2 задаються як сталі величини у відповідності із заданими величиною струму збудження і площею перерізу котушок збудження.

Складові вектора магнітної індукції визначаються за співвідношеннями

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (3)$$

Індукована в електропровідних стрижнях ДСР густина струму визначається

$$\dot{J}_z = (\partial \dot{B}_y / \partial x - \partial \dot{B}_x / \partial y) / \mu. \quad (4)$$

Теплові втрати потужності в стрижнях ДСР визначаються на основі виразу (4)

$$Q(x, y) = \left| \dot{J}_z(x, y) \right|^2 / \gamma. \quad (5)$$

Теплові втрати в обмотках статора і ротора у разі потреби знаходяться звичайним способом за відомих активних опорів обмоток і заданих значеннях струмів в обмотках.

Математична модель температурного поля базується на стаціонарному диференціальному рівнянні теплопровідності. В декартових координатах у двовимірній постановці рівняння записується в наступному вигляді:

$$\lambda \left[\frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial y^2} \right] = -Q(x, y), \quad (6)$$

де $\theta(x, y)$ – невідома функція розподілу температури; λ – коефіцієнт теплопровідності; $Q(x, y)$ – об'ємні питомі джерела теплового поля, Вт/м³, якими є втрати потужності в обмотках ЯСМ у разі роботи в номінальному синхронному режимі, а також в стрижнях ДСР в асинхронному режимі за заданому ковзанні або в несиметричному режимі роботи.

На границі, що є зовнішньою поверхнею ротора, і на внутрішній поверхні розточка статора задаються граничні умови третього роду

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha(\theta - \theta_c), \quad (7)$$

де θ_c – температура охолоджуючого повітря ($\theta_c = 40$ °C), α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря.

В моделі теплового поля необхідно адекватно відобразити процес передачі тепла від мідного стрижня ДСР до магнітопроводу полюсних наконечників через контактну поверхню «стрижень-стінка пазу». З огляду на суттєву шорсткість дотичних поверхонь, неоднорідну (шихтовану) структуру магнітопроводу полюсів тепло передається, в основному, через газові проміжки, що заповнюють простір між виступами в контактній зоні, а також через невеликі ділянки безпосереднього контакту зазначених дотичних поверхонь. За даними літературних джерел [6, 7] для необроблених поверхонь фактична площа механічного контакту складає незначну частину загальної площі дотичних поверхонь – не перевищує 1...2 % загальної площі. Слід також враховувати вплив відцентрових сил, які відтискають стрижень від дна паза, в якому він знаходиться, а також те, що передача тепла в зоні контакту відбувається не через хімічно чисту мідь, а через оксид міді, який покриває поверхню мідного стрижня і має невеликий коефіцієнт теплопровідності. Ці фактори спричиняють суттєвий перепад температури між зазначеними поверхнями.

У цілому явище теплового контактного опору являє складну недостатньо визначену задачу. В роботі цей опір моделюється наступним чином. Між поверхнями стрижня і паза магнітопроводу розміщується контактний шар товщиною $d=0,5$ мм. Еквівалентна теплопровідність шару розраховується за формулою

$$\lambda_{ш} = 0,98\lambda_{нов} + 0,02\lambda_{CuO},$$

де $\lambda_{нов}$ і λ_{CuO} – відповідно, теплопровідність повітря і оксиду міді, а числові коефіцієнти відображають співвідношення площин контактних поверхонь згідно з [7]. Результируючий тепловий контактний опір відображається формулою $R = d / \lambda_{ш}$ і добре корелюється з даними літературних джерел. В даному випадку еквівалентна теплопровідність контактного шару дорівнює

$$\lambda_{ш} = 0,98 \cdot 0,025 + 0,02 \cdot 1,017 = 0,035 \text{ (Вт/(м} \cdot \text{°C))}.$$

Основними величинами у дослідженні температурного поля ЯСМ є: максимальна температура в елементах активної зони, зокрема, в стрижнях ДСР, в осерді полюсів ротора, а також максимальне значення градієнта температури.

Математична модель напружено-деформованого стану базується на системі диференціальних рівнянь в часткових похідних, яка використовується під час розв'язання стаціонарних задач структурної механіки і в загальному вигляді має наступний вигляд:

$$0 = \nabla \cdot FS + \vec{F}, \quad F = \nabla u + I, \quad (8)$$

де ∇ – оператор диференціювання Гамільтона; S – тензор зусилля; F – тензор градієнта деформації; u – X -складова деформації (зміщення); v – Y -складова деформації (зміщення); ∇u – градієнт зміщення; I – момент інерції, ρ – густина матеріалу, \vec{F} – вектор розподіленої масової сили (відцентрова сила при обертанні тіла, сила тяжіння, сила температурної деформації).

Основною розрахунковою величиною для аналізу напружено-деформованого стану є тензор механічного напруження за фон Мізесом, який характеризує усереднене значення механічних напружень, що виникають в одиниці об'єму матеріалу під впливом спільної дії силових факторів різного просторового напрямку і різної фізичної природи.

Збільшення лінійних розмірів (довжин) стрижнів на полюсі ротора за їхнього нагрівання на величину $\Delta\theta_k$ розраховується за формулою

$$\Delta L_k = \alpha_L \cdot L \cdot \Delta\theta_k, \quad k = \overline{1, N}, \quad (9)$$

де N – число стрижнів на полюсі; α_L – коефіцієнт лінійного розширення (для міді його значення дорівнює $\alpha_L = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); L – довжина стрижня.

Чисельна реалізація наведеної математичної моделі виконана методом скінченних елементів в програмному комплексі Comsol Multiphysics. Дослідження термомеханічних напружень в ДСР проводилися в межах одного полюса на основі тривимірної моделі.

Розв'язок двовимірної задачі для електромагнітного поля (1) – (5) дає змогу знайти струми лише в пазових частинах стрижнів ДСР. Задля знаходження струмів в поперечних торцевих короткозамикаючих елементах (ТКЕ) ДСР в програмі National Instruments Multisim було додатково розроблено ланцюгову модель для аналізу розподілу струмів в усіх елементах ДСР ротора, зокрема і в ТКЕ. Фрагмент зазначеної моделі для одного полюсу показано на рис. 1. Струми замикаються в контурах ДСР на полюсі, що складений з 6-ти стрижнів і 5-ти сегментів ТКЕ.

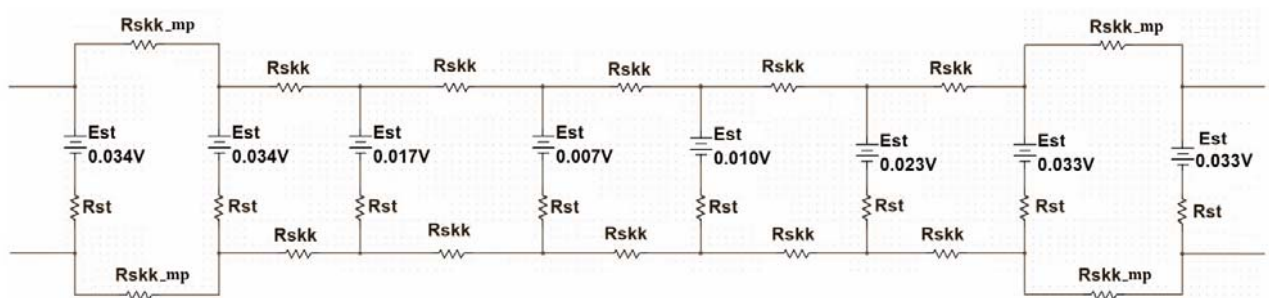


Рис. 1

Схема містить активні опори основних елементів ДСР (їхніми індуктивними опорами можна нехтувати внаслідок малої частоти струму) і ЕРС стрижнів, які знаходяться за результатами розв'язання рівняння поля (1). Чисельні значення опорів: стрижнів – $Rst = 78,82$ мОм; елементів ТКЕ – $Rskk = 4,021$ мОм; міжполюсних з'єднань – $Rskk_mp = 14,44$ мОм. Величини ЕРС стрижнів показано на рис. 1

Об'єкт досліджень. Дослідження проводилися на прикладі явнополюсного синхронного генератора потужністю 500 кВт, який використовується на малих гідроелектростанціях, і має наступні номінальні дані: лінійна напруга обмотки статора $U_l = 6$ кВ; фазний струм статора $I_l = 57$ А; $\cos\phi = 0,9$; ККД $\eta = 94\%$; напруга обмотки збудження – 65 В; струм обмотки збудження – 320 А; кількість полюсів – 12; частота обертання – 500 об/хв; повітряний проміжок – 2,7 мм; кількість пазів статора – 90;

довжина ротора – 0,35 м. Коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря має величину $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; коефіцієнти теплопровідності електричної ізоляції обмоток – $\lambda_{iz} = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, мідних провідників – $\lambda_{Cu} = 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, сталі – $\lambda_{Fe} = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, повітря – $\lambda_{воз} = 0,023 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. На кожному полюсі ротора міститься 6 мідних стрижнів ДСР діаметром 12 мм, які з'єднані між собою сегментами ТКЕ, а між частинами ДСР на полюсах ротора встановлено міжполюсні електричні з'єднання (ДСР має повздовжньо-поперечний тип конструкції). Поперечний переріз активної зони генератора в межах одного полюса показано на рис. 2.

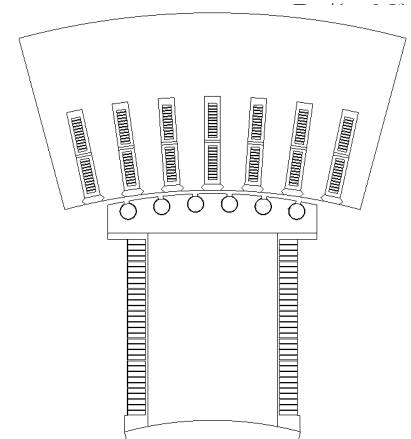


Рис. 2

Величину СЕ ротора характеризують коефіцієнтом відносного ексцентриситету $\varepsilon = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / (\delta_{\max} + \delta_{\min})$, де δ_{\max} , δ_{\min} – максимальна і мінімальна величини проміжку. Коефіцієнт ε змінювався в межах від 0 ($\delta_{\max} = \delta_{\min}$) до 0,74 ($\delta_{\min} = 0,7 \text{ мм}$), як показано у таблиці.

Результати досліджень. 1. Аналіз розподілу струмів в стрижнях ДСР. Предметом дослідження є нерівномірність розподілу струмів між стрижнями ДСР в залежності від режиму роботи ЯСМ і наявності ексцентриситету його ротора.

Параметр	Значення параметра					
$\Delta\delta$, мм	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2
δ_{\max} , мм	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,7
δ_{\min} , мм	2,7	2,3	1,9	1,5	1,1	0,7
ε	0	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74

генераторах тривалість АР не повинна перевищувати 15 с [5]. Але в ЯСМ меншої потужності з технологічних міркувань робота машини в АР за умови зменшення її навантаження може продовжуватися значно довше, наприклад, до усунення аварії в системі збудження ЯСМ. У такому разі *струм обмотки збудження відмикається*. Величини струмів в стрижнях ДСР залежать від ковзання ротора, яке, в свою чергу, залежить від поточного навантаження машини. На рис. 3 показано часові залежності густини струмів в найбільш навантаженому (крайньому лівому) (рис. 2) стрижні для двох граничних режимів роботи за ковзання $s = -0,1$: крива 1 відображає струми в АР за розімкненої обмотці збудження і наявності струму в обмотці статора, а крива 2 – в режимі холостого ходу за розімкненої обмотці статора і номінальному струмі збудження.

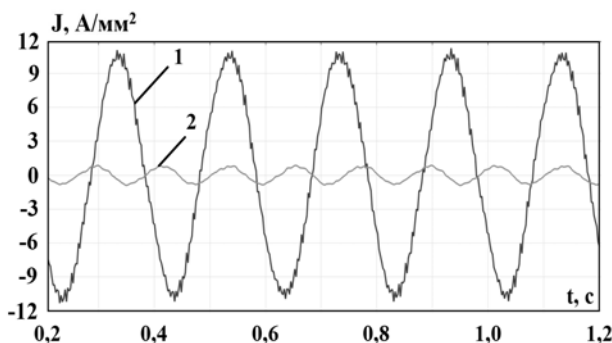


Рис. 3

З рис. 3 видно, що навіть в режимі холостого ходу в стрижнях ДСР протікають струми з густиною $\sim 1 \text{ А}/\text{мм}^2$, що пов'язано з пульсацією магнітного потоку полюса ротора внаслідок його переміщення відносно зубчатого осердя статора. Такі ж величини струмів в ДСР виникають і в номінальному синхронному режимі роботи ЯСМ.

В АР індуквані в ДСР струми виникають внаслідок обертання магнітного поля статора з частотою ковзання відносно стрижнів ротора, як це зазвичай відбувається у асинхронних машинах. Але на відміну від обмоток ротора асинхронних машин (наприклад, білячої клітки), які укладаються в суцільний циліндричний магнітопровід ротора, і тому усі стрижні знаходяться в однакових умовах, ДСР ЯСМ укладається окремими частинами в межах магнітопроводу полюсних наконечників. Це викликає нерівномірний розподіл струмів в стрижнях ДСР – найбільші за величиною струми виникають в стрижнях на краях полюсного наконечника.

Велике значення на величину і розподіл струмів ДСР має наявність статичного ексцентриситету ротора, який часто виникає внаслідок тривалої експлуатації машини. За появи СЕ виникають пульсації основного магнітного потоку полюсів внаслідок періодичної зміни величини повітряного

проміжку над полюсами в процесі обертання ротора. Ці пульсації потоку індукують в короткозамкнених стрижнях ДСР струми, які постійно протікають навіть в синхронному режимі роботи. Якщо ЯСМ має СЕ ротора і переходить в АР, то індуквані в стрижнях струми виникають внаслідок спільної дії двох зазначених вище факторів різної природи. Пульсації магнітного потоку полюсів можуть також індукувати струми і в обмотці збудження (ОЗ), але на відміну від стрижньової демпферної обмотки ОЗ є багатовитковою, і її опір з урахуванням послідовного з'єднання котушок усіх полюсів значно (в сотні разів) перевищує опір ДСР на полюсі. Тому індуквані в ОЗ струми є значно меншими ніж струми в ДСР і у подальшому аналізі не враховувалися.

На рис. 4 показано часові залежності (впродовж часу 2,0 с) густин струмів в крайньому лівому на полюсі стрижні ДСР в АР без СЕ (рис. 4, а) і за наявності СЕ $\varepsilon=0,38$ (рис. 4, б) за наступних ковзань: $s = -0,01$ (крива а); $s = -0,02$ (крива б) і $s = -0,1$ (крива с). Струм обмотки статора в усіх АР має однакове номінальне значення. Як видно з рисунків, в АР амплітуда густини струму сягає 11...14 А/мм², що у разі тривалого АР призводить до перегріву ДСР. Період коливань струмів пропорційний величині ковзаня. На всі криві на рис. 4 накладаються коливання високої частоти, виникнення яких пов'язано з наявністю зубців статора. На відміну від кривих на рис. 4, а, криві струмів на рис. 4, б мають більш складний характер – їхні амплітуди змінюються не тільки з частотою ковзаня магнітного поля статора відносно ротора, але й з частотою механічного обертання ротора внаслідок періодичного проходження полюсів ротора повз ділянок мінімального і максимального повітряних проміжків ЯСМ. Завдяки наявності міжполюсних електричних з'єднань струми з одного полюса ротора перетікають на інший, віддзеркалюючи миттєвий розподіл струмів обмотки статора.

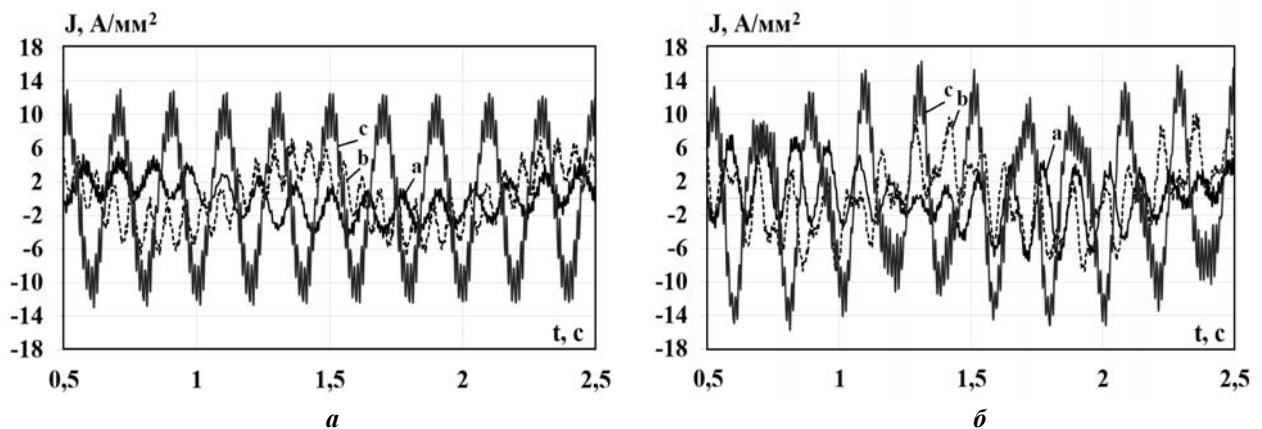


Рис. 4

На рис. 5 для різних значень ковзань, які позначені на кожному рисунку, показано розподіли діючих значень густин струмів в стрижнях ДСР одного полюса (номери стрижнів позначені на осі абсцис). На кожному рисунку приведено 6 кривих, кожна з яких відповідає величині СЕ – ε , які наведено у таблиці, причому більшому значенню ε відповідає вище розташована крива. В АР обмотка збудження розімкнена, а в синхронному режимі – по обмотці збудження протікає номінальний струм. У всіх режимах струм статора має однакове номінальне значення.

З рис. 5 видно, що струми в крайніх стрижнях ДСР на полюсі завжди є суттєво більшими, ніж в центральних стрижнях, причому їхні величини зростають зі збільшенням ковзаня. Зокрема, в асинхронному режимі за ковзаня $s = -0,1$ (рис 5, з) густини струмів в крайніх стрижнях полюса сягають 8,8 А/мм², а за $s = -0,02$ (рис 5, в) вони дорівнюють 5,4 А/мм². Разом з тим за наявності СЕ виникають значні за величиною струми в стрижнях і в синхронному режимі роботи (рис. 5, а). Так, за $\varepsilon=0,74$ діюча густина струму в крайньому стрижні сягає 4 А/мм².

Важливе значення має аналіз нерівномірності розподілу струмів – різниці величин густини струму між окремими стрижнями ДСР в різних режимах роботи ЯСМ. Найбільша нерівномірність розподілу струмів спостерігається за наявності СЕ з $\varepsilon = 0,74$. Зокрема, в синхронному режимі (рис. 5, а) густини струмів в крайніх стрижнях ДСР (№ 1 і № 6) сягають величин 3,9 А/мм², а різниця між крайніми і центральними стрижнями (№ 3 і № 4) становить $\Delta J=3,09$ А/мм². В АР, наприклад, при $s = -0,1$ (рис. 5, з) густини сягають величини 8,8 А/мм², але їхній перепад між стрижнями становить лише $\Delta J=2,27$ А/мм².

Таким чином встановлено, що в синхронному режимі у разі появи СЕ виникає найбільша нерівномірність розподілу струмів між стрижнями ДСР.

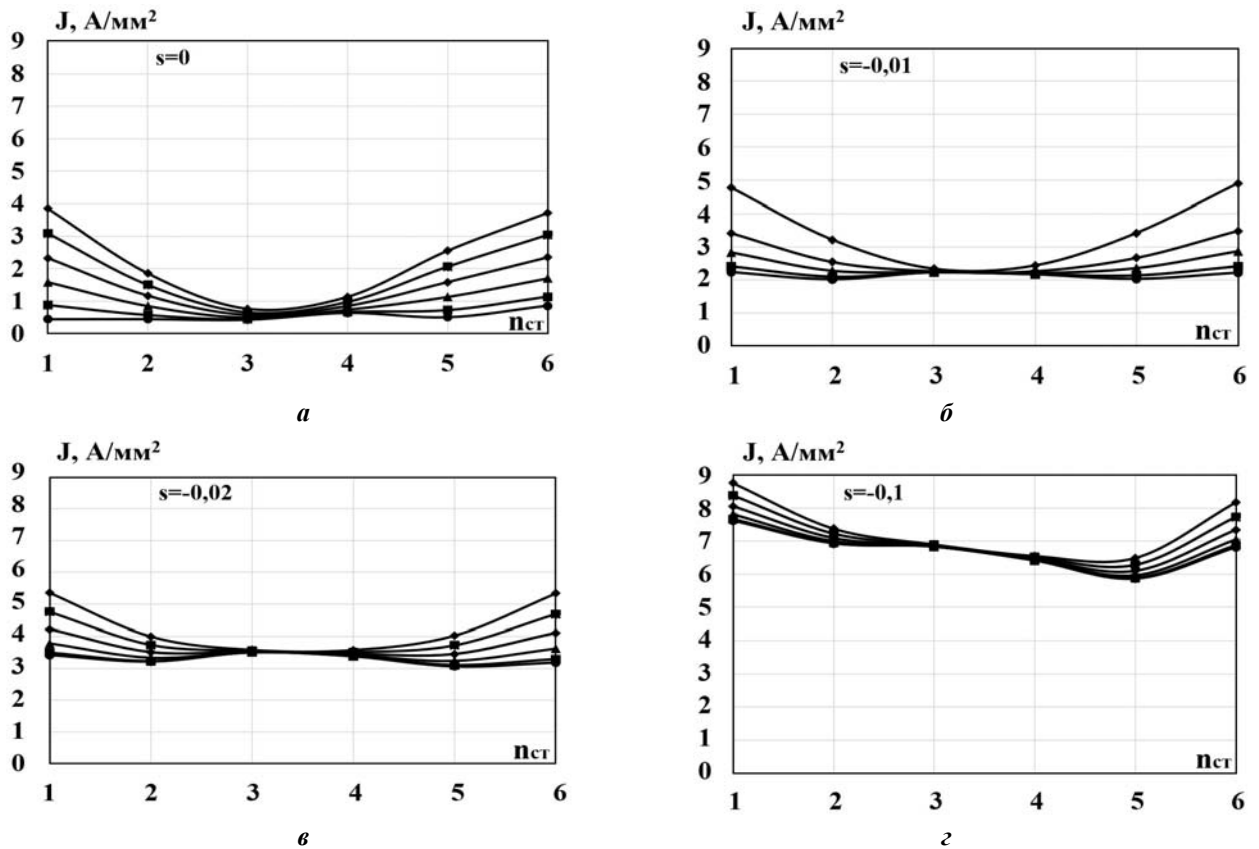


Рис. 5

Рис. 6 відображає залежність максимальної густини струму в крайньому на полюсі стрижні

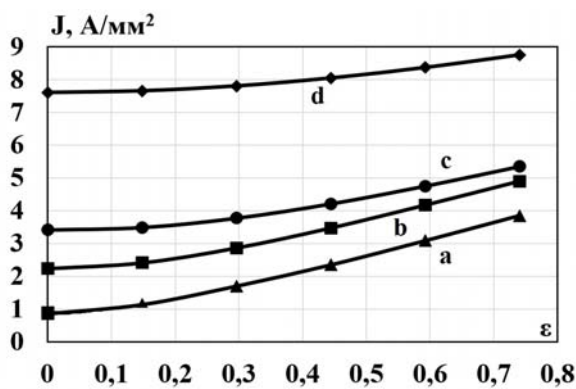


Рис. 6

ДСР №1 від величини СЕ ротора для наступних варіантів. Крива *a* відповідає синхронному режиму ($s=0$). Криві *b*, *c* і *d* відповідають АР за ковзання відповідно: $s = -0,01$; $s = -0,02$; $s = -0,1$. З рис. 6 видно, що під час зростання СЕ максимальна густина струму завжди зростає. Але в більшій мірі це проявляється за малих ковзаннях і в синхронному режимі роботи.

Таким чином, за зростання ковзання амплітуди густин струмів в стрижнях збільшуються, але їхній перепад між стрижнями зменшується. Це пояснюється тим, що під час переходу ЯСМ в АР хвиля обертового магнітного поля рухається з частотою ковзання відносно усіх стрижнів ДСР і більш рівномірно індукує в них струми.

Збільшення струмів крайніх стрижнів пояснюється крайовими ефектами на краях полюса внаслідок розриву магнітопроводу полюса в напрямку руху хвилі магнітного поля (так званий “повздовжній крайовий ефект”). Але чим більші ЕРС і струми в стрижнях, тим більш рівномірно вони розподіляються. В синхронному режимі найбільші струми в крайніх стрижнях обумовлені тим, що саме крайні стрижні утворюють контур, який має найбільшу площу і тому охоплює більшу частину полюсного наконечника і, відповідно, пульсуючого магнітного потоку полюса.

В несиметричному режимі (НР) ЯСМ струми фаз статора мають різні величини, в результаті чого виникає складова обертового магнітного поля, що обертається в протилежному напрямку до напрямку обертання ротора і індукує в ДСР струми частотою 100 Гц. Розрахунки в НР ЯСМ викону-

валися за умови, що струм статора є номінальним, а амплітуда струмів зворотної послідовності статора дорівнює 8% від номінального значення, що відповідає існуючим нормативам роботи синхронних машин в НР. У цьому разі ковзання ротора відносно магнітного поля, створеного струмами статора зворотної послідовності, дорівнює $s=2$. Індукований в обмотці збудження струм не враховувався, оскільки струми частотою 100 Гц екрануються розташованою в полюсних наконечниках ДСР. Результати розрахунків показали, що за дотримання зазначених умов максимальна густина струмів ДСР в НР не перевищує 2 А/мм^2 , причому розподіл струмів між стрижнями є достатньо рівномірним.

Проведений розрахунковий аналіз дає змогу зробити наступні висновки.

1. Робота ЯСМ в АР завжди супроводжується нерівномірним розподілом індукованих струмів в окремих стрижнях ДСР. Найбільші струми протікають в стрижнях, які розташовані на краях полюсних наконечників. В залежності від величини ковзання відношення величин струмів в окремих стрижнях знаходиться в межах 1,5 ... 1,8 рази. Відповідно нерівномірність втрат в стрижнях, які пропорційні струму в другій степені, лежить в діапазоні 2,25 ... 3,25.

2. Поява СЕ призводить до суттєвого нерівномірного розподілу струмів, який спостерігається як в синхронних, так і в асинхронних режимах роботи. В залежності від величини СЕ нерівномірність розподілу струмів може складати 4...5 разів. Причому, на відміну від короткочасних АР, в сталому синхронному режимі за появи СЕ струми в ДСР протікають постійно, викликаючи не тільки зниження ККД ЯСМ, але й несиметричний нагрів ДСР.

3. В НР струми в ДСР розподілені між стрижнями більш рівномірно, ніж в АР.

2. Нагрів і термомеханічна деформація стрижнів в пазовій зоні ДСР. За даними електромагнітних розрахунків розраховано розподіл температури в полюсі ДСР. На рис. 7, а в залежності від номера стрижня зображено значення їхньої температури (в $^{\circ}\text{C}$), а на рис. 7, б – термомеханічні напруження (в МПа) для наступних варіантів за наявності СЕ $\varepsilon=0,74$: крива а – за $s=0$; криві b, c, d відповідно за ковзань $s=-0,01$, $s=-0,02$, $s=-0,1$; а також за відсутності СЕ крива e за $s=0$.

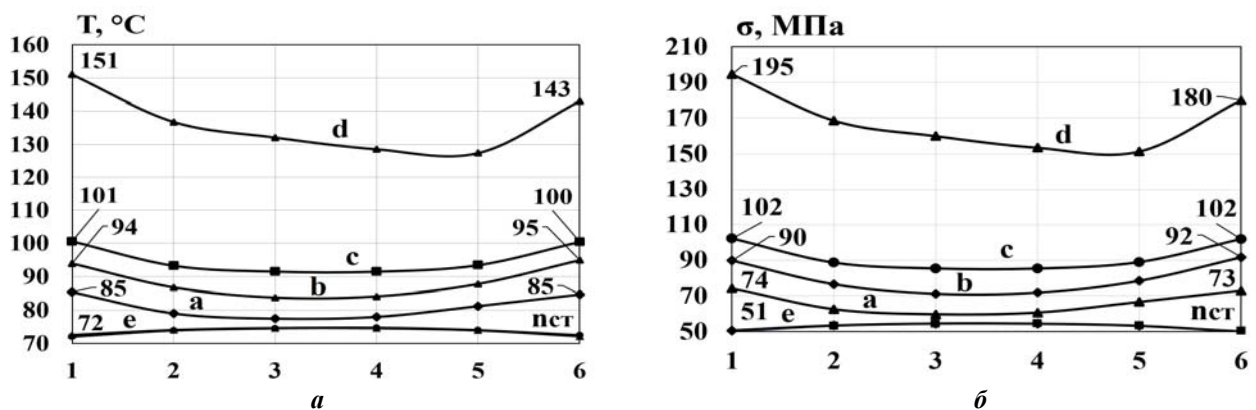


Рис. 7

З рис. 7 видно, що у разі появи СЕ $\varepsilon=0,74$ в АР за $s=-0,1$ крайні стрижні ДСР (№ 1 і № 6 на полюсі) мають найвищу температуру, і в них виникають найбільші повздовжні термомеханічні напруження. У порівнянні з номінальним синхронним режимом ЯСМ, за якого температура усіх стрижнів майже однакова і знаходиться в межах $72...75^{\circ}\text{C}$, в досліджуваному режимі роботи спостерігається не тільки суттєве збільшення нагріву крайніх стрижнів, але й значна несиметрія нагріву ДСР.

Так, наприклад, за ковзання $s=-0,1$ максимальна температура стрижнів зростає на 79°C до величини 151°C , а різниця температур окремих стрижнів сягає 24°C . У такому разі різниця аксіальних подовжень нерівномірно нагрітих стрижнів ДСР доходить до 1 мм, що викликає в стрижнях ДСР повздовжні термомеханічні напруження $100...200 \text{ МПа}$, близькі до межі плинності міді ($\sigma_{пл \text{ Cu}}=280 \text{ МПа}$). Тому за таких значен ковзань, незважаючи на незначну тривалість процесу нагріву стрижнів, мідні стрижні ДСР (особливо крайні) можуть набувати пластичної залишкової деформації, коли після

усунення прикладених сил від термомеханічних напружень стрижнів не відновлює свою початкову форму і розміри.

3. Термомеханічні напруження у торцевих короткозамикаючих елементах ДСР. Для розрахунку термомеханічних напружень в елементах торцевої зони ДСР і аналізу механізму руйнації стрижнів і ТКЕ розроблено тривимірну польову математичну модель напружень в ДСР в межах одного полюсу (рис. 8). За результатами моделювання визначено, що навіть за малих значень подовжень і термомеханічних напружень вирішальним фактором щодо відриву стрижня від ТКЕ є утворення зламних зусиль, що виникають внаслідок інтегрального подовження усіх стрижнів одного полюсу. Механічний момент прикладається до окремих ТКЕ, які з'єднують між собою різні стрижні полюсного наконечника. Під час розрахунків вважалося, що частина стрижня, розміщеного в пазу полюсного наконечника, є рухомою тільки в аксіальному напрямку.

На рис. 8 в градієнті сірого кольору (на рисунку надана шкала відтінків з позначками відповідних значень термомеханічних напружень в МПа) показано термомеханічні напруження для варіанту $\epsilon=0,74$, $s=0$. Також на цьому рисунку показано термомеханічні деформації ТКЕ полюса, які для наочності гіперболізовані в 500 разів і відображають форму і вигин ТКЕ в результаті деформування. З рис. 8 видно, що найбільші термомеханічні напруження виникають зі сторін крайніх стрижнів ДСР, які подовжуються в більшій мірі ніж центральні стрижні і тому найбільше виступають з пазів полюсного наконечника. З боку ТКЕ на крайні стрижні діють сили стискання, а в точках зварки стрижнів у середині полюса діють сили на розрив, що є більш небезпечним і може привести до розриву стрижнів. Тобто ушкоджуються не тільки крайні, а й центральні стрижні в полюсі ротора. Термомеханічні напруження в крайніх стрижнях для даного режиму сягають величини 223 МПа. Після зупинки ЯСМ зазначені зламні зусилля зникають, але надалі циклічно повторюються за кожного включення машини. Навіть, якщо ці напруження не перевищують критичних значень, то в процесі експлуатації поступово накопичуються втомні деформації матеріалу та відбувається подальша руйнація ДСР.



Рис. 8

Як витікає з отриманих результатів дослідження, першопричиною процесів деградації і ушкодження ДСР ЯСМ є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, що виникає під час роботи машини в АР або появи статичного ексцентриситету ротора. Хоча наведені результати отримані на прикладі конкретної ЯСМ, але виявлені закономірності фізичних процесів мають загальний характер і справедливі для ЯСМ іншої потужності і конструктивного виконання. Тому заходи щодо удосконалення конструкції ДСР ЯСМ повинні бути направлені на зменшення зазначеної нерівномірності розподілу струмів в стрижнях. За результатами проведених досліджень можна рекомендувати наступні конструктивні заходи.

4. Рекомендації щодо конструктивного удосконалення ДСР ЯСМ.

Як витікає з отриманих результатів дослідження, першопричиною процесів деградації і ушкодження ДСР ЯСМ є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, що виникає під час роботи машини в АР або появи статичного ексцентриситету ротора. Хоча наведені результати отримані на прикладі конкретної ЯСМ, але виявлені закономірності фізичних процесів мають загальний характер і справедливі для ЯСМ іншої потужності і конструктивного виконання. Тому заходи щодо удосконалення конструкції ДСР ЯСМ повинні бути направлені на зменшення зазначеної нерівномірності розподілу струмів в стрижнях. За результатами проведених досліджень можна рекомендувати наступні конструктивні заходи.

1. На полюсах потрібно розташовувати парну кількість стрижнів. У випадку їхньої непарної кількості в центрі полюса завжди розміщується один стрижень, в якому за появи СЕ індуковані струми не протікають, що призводить до найбільшої несиметрії нагріву ДСР.

2. Стрижні, що розташовані на краях полюсних наконечників, потрібно виконувати зі збільшеними на 20...30% діаметрами у порівнянні з діаметрами інших стрижнів. Це призводить до зменшення їхнього активного опору, електричних втрат і нагріву (рис. 9, а).

3. Крайні стрижні у порівнянні з іншими стрижнями потрібно більше (на 2...3 мм) заглиблювати у полюсні наконечники і виконувати без шліців, що призводить до зростання їхніх магнітних потоків розсіювання і, як наслідок, до збільшення їхнього індуктивного опору (рис. 9, б).

4. Крок між стрижнями на полюсі може обиратися не рівномірним, а зменшуватися в напрямку країв полюса. Це забезпечить наближене до країв полюса компакте розташування груп стрижнів і вирівнювання величин струмів в усіх стрижнях за появи СЕ (рис. 9, в). Можливе також більш компакте розташування стрижнів у центральній частині полюсного наконечника.

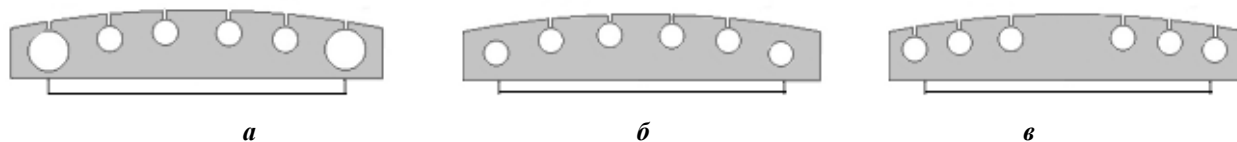


Рис. 9

Вибір конструктивних варіантів та конкретні параметри їхнього виконання повинні конкретизуватися під час проведення докладних електромагнітних розрахунків.

Також потрібно продовжувати розробку методів та засобів точного контролю величини СЕ, який є однією з головних причин ушкодження ДСР, і терміново усувати СЕ.

Висновки. Збільшення випадків ушкодження демпферної системи ротора потужних явнополюсних синхронних машин потребує системного дослідження і розробки рекомендацій щодо удосконалення конструкції ДСР.

Доведено, що першопрчиною процесів деградації і ушкодження ДСР ЯСМ є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, яка виникає під час роботи машини в асинхронному режимі або появи характерного дефекту ЯСМ – статичного ексцентриситету ротора. Найбільші за величиною індуковані струми і нагрів виникають в стрижнях, що розташовані на краях полюсних наконечників, у той час коли центральні стрижні на полюсі нагріваються суттєво менше. Такий несиметричний нагрів ДСР призводить до значних термомеханічних напружень в елементах ДСР, які суттєво залежать від ковзання ротора в асинхронному режимі і величини ексцентриситету. За значних ковзаннях і ексцентриситеті виникають неприпустимо великі зламні зусилля, які розривають стрижні і торцеві короткозамикаючі елементи ДСР.

Запропоновано певні конструктивні удосконалення ДСР з метою зменшення негативного впливу зазначених факторів.

1. Артюх С.Ф., Урманов О.Б. Статистический анализ отказов электрооборудования на гидроэлектростанциях каскада киевских ГЭС-ГАЭС. *Вісник НТУ «ХП»*. 2011. № 41. С. 3-7.
2. Васьковський Ю.М., Цивінський С.С., Титко О.І. Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідрогенераторів при нерівномірності повітряного проміжку. *Техн. електродинаміка*. 2015. № 1. С. 65-71.
3. Васьковський Ю.М., Поташник С.І., Федоренко Г.М. Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності функціонування демпферних систем потужних гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2009. № 4. С.28-34.
4. Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. Вибровозмущающие электромагнитные силы в короткозамкнутых асинхронных двигателях при наличии повреждения их конструкции. *Техн. електродинаміка*. 2010. № 5. С. 31-38.
5. ГОСТ 5616-89: Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия. Москва, ИПК Издательство стандартов, 2003, 18 с.
6. Меснянкін С.Ю., Диков А.В. Расчет термического сопротивления контакта элементов энергетических установок с волнистыми поверхностями. *Труды МАИ*. 2014. № 8. С. 46-51.
7. Шлыков А.П., Ганин Е.А. Термическое сопротивление контакта. *Атомная энергия*. 1960. № 9. С.35-34.
8. Yong Liao, Zhen Nan Fan, Li Han, Li Dan Xie. Analysis of the Loss and Heat on Damper Bars in Large Tubular Hydro-Generator base on the 3D Electromagnetic-Temperature field Calculation. *Przeгляд Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012. R. 88 NR 5b. Pp. 97-100.
9. Karmaker H.C. Broken Damper Bar Detection Studies Using Flux Probe Measurements and Time-Stepping Finite Element Analysis for Salient-Pole Synchronous Machines. 4th IEEE International Symposium on *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003)*. Atlanta, GA, USA, August 24-26, 2003. Pp.193-197.

INFLUENCE OF REGIME AND OPERATIONAL FACTORS ON THE DAMPER SYSTEM OF THE SALIENT-POLE SYNCHRONOUS MACHINE ROTOR

Yu.M. Vaskovsky, O.A. Geraskin

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

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

e-mail: vun157@gmail.com, nirbikalpasamadhi@ukr.net

The physical processes in the damping system of the salient-pole synchronous machine rotor, which cause the gradual destruction of its structure, have been studied. In particular, the distributions of currents, temperatures and thermomechanical stresses in the damping system rods during its operation in asynchronous and asymmetric modes of operation, as well as in case of rotor eccentricity. A field mathematical model has been developed that takes into account the combined action of three physical fields of different nature: electromagnetic, temperaturic, and thermomechanical stress fields, and allows estimating heating and thermomechanical loads in the damping system of the rotor of the salient-pole synchronous machine. According to the results of the analysis, the heating and thermomechanical loads of the structural elements were determined and recommendations for its structural improvement were given. References 9, figures 9, tables 1.

Keywords: explicit pole synchronous machine, damping system, asynchronous and asymmetrical modes, temperature, thermomechanical stresses and deformations.

1. Artyukh S.F., Urmanov O.B. Statistical analysis of electrical equipment failures at hydroelectric power stations of the Kiev hydroelectric station cascade of the HPP-PSP. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Kharkivskii Politekhnichni Instytut*. 2011. No 41. Pp. 3-7. (Rus)

2. Vaskovsky Yu.M., Civinskyi S.S., Titko O.I. Electromagnetic processes in the rotor damping system of a hydro-generator with unevenness of the air gap. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 1. Pp. 65-71. (Ukr)

3. Vaskovsky Yu.M., Potashnik S.I., Fedorenko G.M. Improving the reliability, level of safety and efficiency of the of damping systems functioning of powerful hydrogenerators. *Hidroenergetyka Ukrainy*. 2009. No 4. Pp. 28-34. (Ukr)

4. Vaskovsky Yu.N., Geraskin A.A. Vibroperturbing electromagnetic forces in squirrel-cage induction motors in the presence of damage in their construction. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 5. Pp. 31-38. (Rus)

5. GOST 5616-89: Hydro-turbine electric generators and generators-motors. General technical conditions. Moskva, IPK, Izdatelstvo standartov, 2003, 18 p. (Rus)

6. Mesnyankin S.Yu., Dikov A.V. Calculation of power plants elements contact thermal resistance with wavy surfaces *Trudy MAI*. 2014. No 8. Pp. 46-51. (Rus)

7. Shlykov A.P., Ganin E.A. Thermal contact resistance. *Atomnaya energiya*. 1960. No 9. Pp.35-34. (Rus)

8. Yong Liao, Zhen Nan Fan, Li Han, Li Dan Xie. Analysis of the Loss and Heat on Damper Bars in Large Tubular Hydro-Generator base on the 3D Electromagnetic-Temperature field Calculation. *Przeгляд Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012. R. 88 NR 5b. Pp. 97-100.

9. Karmaker H.C. Broken Damper Bar Detection Studies Using Flux Probe Measurements and Time-Stepping Finite Element Analysis for Salient-Pole Synchronous Machines. 4th IEEE International Symposium on *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003)*. Atlanta, GA, USA, August 24-26, 2003. Pp.193-197.

Надійшла 28.05.2020

Остаточний варіант 12.08.2020