

*Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О.А. ГЕРАСКІН, К.М. ТАТАРИНОВ*

### ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ УШКОДЖЕННЯ ДЕМПФЕРНОЇ СИСТЕМИ РОТОРА СИНХРОННИХ МАШИН

Методами математичного моделювання досліджені фізичні процеси в демпферній системі ротора при появі статичного ексцентриситета ротора для двох типів явнополюсних синхронних машин - капсульного гідрогенератора SGK 538/160-70М потужністю 22 МВт і синхронного генератора потужністю 500 кВт. Розроблено польову математичну модель, що враховує спільну дію трьох фізичних полів різної природи: електромагнітного, температурного та поля термомеханічних напружень, і дозволяє оцінити нагрів і тривимірний розподіл термомеханічних напружень в елементах конструкції демпферної системи ротора явнополюсної синхронної машини. Зазначені фізичні процеси викликають поступову руйнацію конструкції демпферної системи ротора. Доведено, що першопричиною процесів деградації і ушкодження демпферної системи ротора явнополюсної синхронної машини є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, яка виникає при роботі машини в асинхронному режимі або при появі статичного ексцентриситета 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 демпферної системи ротора призводить до значних термомеханічних напружень в елементах демпферної системи ротора, які суттєво залежать від величини ексцентриситета і ковзання ротора в асинхронному режимі. На величину сумарних термомеханічних напружень в стрижнях впливають не тільки аксіально направлені сили, але й поперечні сили в торцевих короткозамикаючих елементах. При значних ковзаннях і ексцентриситеті виникають неприпустимо великі зламні зусилля, які розривають стрижні і торцеві короткозамикаючі елементи демпферної системи ротора. За результатами аналізу визначено нагрів і термомеханічні напруження елементів конструкції й надано рекомендації щодо її конструктивного удосконалення.

**Ключові слова:** явнополюсна синхронна машина, демпферна система ротора, статичний ексцентриситет ротора, температура, термомеханічні напруження і деформації.

*Ю. Н. ВАСЬКОВСКИЙ, А. А. ГЕРАСКИН, К. М. ТАТАРИНОВ*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЫ РОТОРА СИНХРОННЫХ МАШИН

Методами математического моделирования исследованы физические процессы в демпферной системе ротора при появлении статического эксцентриситета ротора для двух типов явнополюсных синхронных машин - капсульного гидрогенератора SGK 538/160-70М мощностью 22 МВт и синхронного генератора мощностью 500 кВт. Разработана полевая математическая модель, учитывающая совместное действие трех физических полей различной природы: электромагнитного, температурного и поля термомеханических напряжений, и позволяет оценить нагрев и трехмерное распределение термомеханических напряжений в элементах конструкции демпферной системы ротора явнополюсной синхронной машины. Указанные физические процессы вызывают постепенное разрушение конструкции демпферной системы ротора. Доказано, что первопричиной процессов деградации и повреждения демпферной системы ротора явнополюсной синхронной машины является неравномерность распределения индуцированных токов в стержнях на полюсах ротора, которая возникает при работе машины в асинхронном режиме или при появлении статического эксцентриситета ротора. Наибольшие по величине индуцированные токи и нагрев возникают в стержнях, расположенных на краях полюсных наконечников, в то время как центральные стержни на полюсе нагреваются существенно меньше. Такой несимметричный нагрев демпферной системы ротора приводит к значительным термомеханическим напряжениям в элементах демпферной системы ротора, которые существенно зависят от величины эксцентриситета и скольжения ротора в асинхронном режиме. На величину суммарных термомеханических напряжений в стержнях влияют не только аксиально направлены силы, но и поперечные силы в торцевых короткозамыкающих элементах. При значительных скольжениях и эксцентриситете возникают недопустимо большие слывающие усилия, которые разрывают стержни и торцевые короткозамыкающие элементы демпферной системы ротора. По результатам анализа определены нагрев и термомеханические напряжения элементов конструкции и даны рекомендации по ее конструктивному усовершенствованию.

**Ключевые слова:** явнополюсная синхронная машина, демпферная система ротора, статический эксцентриситет ротора, температура, термомеханические напряжения и деформации.

*Yu. N. VASKOVSKIY, A. A. GERASKIN, K. M. TATARINOV*

### RESEARCH OF DAMPER SYSTEM DAMAGE PHYSICAL PROCESSES OF SYNCHRONOUS MACHINES ROTOR

The physical processes in the damper system of the rotor with the appearance of a static eccentricity of the rotor for two types of salient-pole synchronous machines - a capsule hydrogenator SGK 538/160-70M with a capacity of 22 MW and a synchronous generator with a capacity of 500 kW were investigated by means of mathematical modeling. A field mathematical model has been developed that takes into account the combined action of three physical fields of different nature: electromagnetic, temperature and field of thermomechanical stresses, and makes it possible to evaluate the heating and three-dimensional distribution of thermomechanical stresses in the structural elements of the rotor damper system of a salient-pole synchronous machine. These physical processes cause gradual destruction of the structure of the rotor damper system. It is proved that the primary cause of degradation and damage of the damping system of the rotor of an open-pole synchronous machine is the uneven distribution of induced currents in the rods at the poles of the rotor, which occurs when the machine works asynchronously or with the appearance of rotor static eccentricity. The largest induced currents and heat occur in the rods located at the edges of the pole pieces, while the central rods at the pole are heated significantly less. This asymmetric heating of the damping system of the rotor leads to significant thermomechanical stresses in the elements of the damping system of the rotor, which significantly depend on the magnitude of the eccentricity and slipperiness of the rotor in asynchronous mode. The magnitude of the total thermomechanical stresses in the rods is influenced not only by axially directed forces, but also by transverse forces in the end short-circuiting elements. At considerable slipperiness and eccentricities there are inadmissibly big breaking forces which break cores and face short-circuiting elements of a damping system of a rotor. According to the results of the analysis, the heating and thermomechanical stresses of the structural elements were determined and recommendations for its structural improvement were given.

© Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, К. М. Татарінов, 2021

**Keywords:** salient-pole synchronous machine, rotor damper system, static eccentricity of the rotor, temperature, thermomechanical stress and deformation.

**Вступ.** Демпферна система ротора (ДСР) явнополюсної синхронної машини (ЯСМ) виконує важливі експлуатаційні функції щодо утримання ротора ЯСМ в синхронному режимі роботи при виникненні раптових зовнішніх збурень. Зокрема, ДСР ефективно гасить коливання швидкості ротора, що виникають внаслідок зовнішніх збурень, а також може забезпечувати короткочасну роботу ЯСМ в асинхронному режимі при випаданні її ротора з синхронізму.

Вважається, що конструкція ДСР є досить простою і при правильному виборі параметрів струменосучих стрижнів характеризується в межах встановлених заводом-виробником гарантійних термінів експлуатації високою надійністю. Але при подальшій експлуатації ЯСМ внаслідок поступової деградації конструкції машини на практиці спостерігається суттєве збільшення кількості випадків ушкоджень і навіть руйнації ДСР, що призводить до раптових аварійних зупинок машини [1]. Особливо це характерно для потужних ЯСМ – гідрогенераторів, автономних потужних синхронних генераторів тощо. З огляду на старіння існуючого парку потужних синхронних 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.

В ряді досліджень [2-4] встановлено, що однією з головних причин ушкоджень ДСР є поява статичного ексцентриситета (СЕ) ротора ЯСМ, при якому відбувається зсув повздожніх вісей статора і ротора і, як наслідок, поява нерівномірності повітряного проміжку між статором і ротором уздовж кола розточки статора. СЕ є небажаною, але характерною для тихохідних ЯСМ деградацією конструкції, оскільки ЯСМ, зазвичай, мають великий діаметр ротора і відносно невелику висоту повітряного проміжку. Очевидно, що необхідно застосовувати методи поточного контролю рівномірності повітряного проміжку, але досвід експлуатації ЯСМ свідчить про складність забезпечення такої рівномірності.

Суть фізичних процесів, які відбуваються в ЯСМ при появі СЕ, полягає у наступному [2]. При обертанні ротора ЯСМ в нерівномірному повітряному проміжку в кожному з полюсів ротора виникають пульсації основного магнітного потоку, які індукують в ДСР струми, оскільки пульсуючий магнітний потік полюса безпосередньо зчіплюється з площиною ДСР. Ці струми не пов'язані з асинхронним рухом або коливаннями швидкості ротора, обумовлені лише появою СЕ і під час експлуатації машини протікають постійно, викликаючи нагрів елементів ДСР. Причому розподіл струмів в стрижнях ДСР і їх нагрів є суттєво нерівномірним, що призводить до появи значних несиметричних термомеханічних напружень і деформацій в ДСР. І, хоча ці напруження можуть і не перевищувати меж міцності конструктивних матеріалів, але внаслідок частих пусків і зупинок ЯСМ відбувається поступова втома матеріалів, що призводить до дегра-

дації і подальшої руйнації ДСР. На рис. 1, як приклад, показано ушкодження ДСР капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160–70М. На рис. 1 а) зображено вид ушкодженого полюса з боку торцевого короткозамикаючого елемента, який відірвався від стрижнів; на рис 1 б) зображено вид поверхні ушкодженого полюса, який внаслідок появи СЕ при обертанні ротора, торкався поверхні осердя статора.

Таким чином, дослідження фізичних процесів, які призводять до руйнації ДСР ЯСМ, є актуальною проблемою, а результати таких досліджень дозволяють обґрунтовано розробляти технічні рішення щодо удосконалення конструкцій ДСР в умовах експлуатації ЯСМ з наявним СЕ ротора.

**Метою роботи** є дослідження методами математичного моделювання та узагальнення особливостей термомеханічних процесів в ДСР ЯСМ, яка експлуатується при наявності СЕ ротора.

**Об'єкти дослідження.** Дослідження проводилися на прикладі двох суттєво різних ЯСМ:

1) капсульного гідрогенератора СГК 538/160–70М, потужністю 22 МВт який має дані: лінійна напруга і фазний струм обмотки статора – 6,3 кВ і 2070 А;  $\cos\varphi = 0,974$ ; ККД = 96,1%; напруга і струм обмотки ротора – 390 В і 1040 А відповідно; кількість полюсів – 70; частота обертання – 85,7 об/хв; на кожному полюсі ротора розташовано 3 мідних стрижня діаметром 17,5 мм; між стрижнями на різних полюсах ротора встановлено міжполюсні електричні з'єднання; довжина ротора 1,6 м; повітряний проміжок під серединою полюса  $\delta=6$  мм.

2) синхронного генератора СГ-500 потужністю 500 кВт, який використовується на малих гідроелектростанціях і має наступні номінальні дані: лінійна напруга і фазний струм обмотки статора  $U_1=6$  кВ і  $I_1=57$  А;  $\cos\varphi = 0,9$ ; ККД  $\eta=94$  %; напруга і струм обмотки ротора – 65 В і 320 А відповідно; кількість полюсів – 12; частота обертання – 500 об/хв; повітряний проміжок – 2,7 мм; довжина ротора – 0,35 м.

**Математична модель** враховує спільну дію 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 векторного магнітного потенціалу описується квазістационарним рівнянням:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \dot{A}_z\right) - j\omega_1 s \gamma \dot{A}_z = -J_{z\text{cm}}, \quad (1)$$

де  $\omega_1 = 2\pi f_1$  – кутова частота струму статора,  $s$  – ковзання ротора,  $\mu$  – магнітна проникність,  $\gamma$  – електропровідність,  $J_{z\text{cm}}$  – 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 яра статора і дозволяє розрахувати поле машини в асинхронному і синхронному режимах роботи.



а



б

Рис. 1. Ушкодження, що мали місце при експлуатації капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160–70М

Для чисельного розв'язання рівняння (1) використовується метод багатопозиційних розрахунків. Для обраного інтервалу часу  $T$ , на якому аналізується електромагнітний процес, обирається крок по часу  $\Delta t$  і виконується серія розв'язків рівняння (1) поля з урахуванням зміни кутового положення ротора і величин струмів фаз статора, які відбуваються за час  $\Delta t$ . Тобто, при кожному з положень ротора розраховується сталий гармонійний електромагнітний процес. Після розрахунків достатньої кількості окремих задач при різних положеннях ротора і різних значеннях струму статора та їх 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 при відповідних цьому моменту часу величинах густини струмів фаз статора, які визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{Acm} &= J_m \cos \alpha_k, \\ \dot{J}_{Bcm} &= J_m \left[ \cos(\alpha_k + 2\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 2\pi/3) \right], \\ \dot{J}_{Ccm} &= J_m \left[ \cos(\alpha_k + 4\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 4\pi/3) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

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;  $\alpha_k = \omega_R t_k$ ,  $\omega_R$  – кутова швидкість обертання ротора,  $t_k = t_{k-1} + \Delta t$ ,  $k = 1, \dots, N$ ;  $N$  – кількість кроків по часу.

Величина  $\mu$  в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається при чисельному розв'язанні 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 обмотці збудження  $J_2$  задається 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 так:

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

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

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

Теплові втрати в обмотках статора і ротора знаходяться при відомих активних опорах 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;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $Q(x, y)$  – об'ємні питомі джерела теплового поля, Вт/м<sup>3</sup>, якими є втрати потужності в обмотках ЯСМ при роботі в номінальному синхронному режимі, а також в стрижнях ДСР в асинхронному режимі і при СЕ.

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

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

де  $\theta_C$  – температура охолоджуючого повітря ( $\theta_C = 40$  °С),  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря.

Модель напружено-деформованого стану базується на системі диференціальних рівнянь в часткових похідних, яка використовується при розв'язанні стаціонарних задач структурної механіки і в загальному вигляді має наступним вигляд:

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

де  $\nabla$  – оператор Гамільтона;  $S$  – тензор зусилля;  $F$  – тензор градієнта деформації;  $u$  –  $X$ -складова деформації (зміщення);  $v$  –  $Y$ -складова деформації (зміщення);  $\nabla u$  – градієнт зміщення;  $I$  – момент інерції,  $\rho$  – густина матеріалу,  $\vec{F}$  – вектор розподіленої масової сили (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.

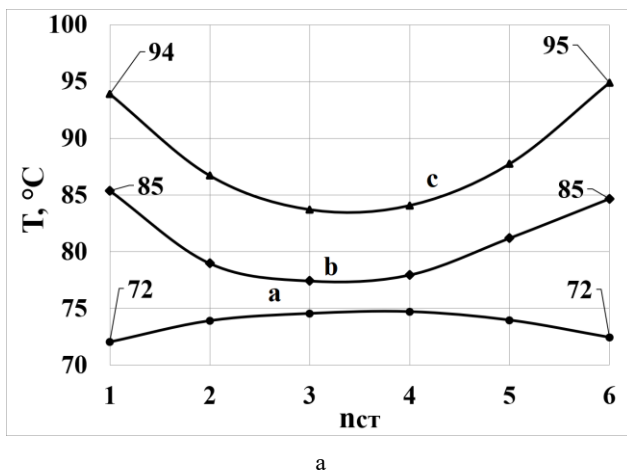
Збільшення лінійних розмірів (довжин) стрижнів на полюсі ротора при їх нагріванні на величину  $\Delta\theta_k$  розраховуються за формулою:

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

де  $N$  – число стрижнів на полюсі;  $\alpha_L$  – коефіцієнт лінійного розширення міді;  $L$  – довжина стрижня.

**Результати досліджень.** Оскільки розподіл струмів і температури стрижнів ДСР є проміжним результатом, потрібним для визначення розподілу термомеханічних напружень (ТМН), то основна увага далі приділяється аналізу саме ТМН. Для комплексної оцінки доцільно провести порівняльний аналіз нагріву і ТМН при роботі ЯСМ в синхронному і асинхронному режимах при відсутності та наявності СЕ.

*Термомеханічні напруження в стрижнях ДСР.* На рис. 2, а для СГ-500 в залежності від номера стрижня



на полюсі зображено значення температури стрижнів, а на рис. 2, б – абсолютні значення ТМН стрижнів для наступних розрахункових варіантів: крива а) відповідає синхронному номінальному режиму роботи генератора при відсутності СЕ; крива б) – синхронному номінальному режиму роботи при наявності СЕ  $\varepsilon = 0,74$ ; крива в) – сталому асинхронному режиму при ковзанні  $s = -0,01$  і при наявності СЕ  $\varepsilon = 0,74$ .

З рис. 2 видно, що у порівнянні з номінальним синхронним режимом СГ-500, при якому температура усіх стрижнів майже однакова і знаходиться в межах 72...75 °С, при появі СЕ спостерігається суттєва нерівномірність розподілу зазначених величин, причому спостерігається суттєве збільшення нагріву і ТМН крайніх стрижнів. Ще більша нерівномірність розподілу температури і ТМН виникає при роботі генератора в асинхронному режимі і наявності СЕ. При збільшенні ковзання нерівномірність суттєво зростає. Так, наприклад, при  $s = -0,1$  максимальна температура стрижнів зростає до величини 151 °С, а різниця температур окремих стрижнів сягає 24 °С. При цьому різниця аксіальних подовжень стрижнів ДСР доходить до 1 мм, що викликає в стрижнях ДСР повздовжні термомеханічні напруження 100...200 МПа, які близькі до межі плинності міді ( $\sigma_{пл} = 280$  МПа). Тому при таких значеннях ковзань, незважаючи на незначну тривалість нагріву, мідні стрижні ДСР (особливо крайні) можуть набувати пластичної залишкової деформації.

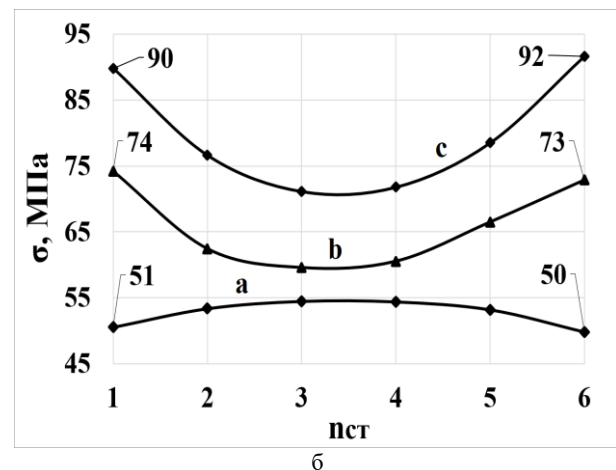


Рис. 2. Розподіл температури і термомеханічних напружень стрижнів ДСР ЯСМ 500 кВт

*Термомеханічні напруження в торцевих короткозамикаючих елементах (ТКЕ).* За результатами моделювання визначено, що вирішальним фактором щодо відриву стрижня від ТКЕ є утворення зламних зусиль, що виникають внаслідок сумарного подовження усіх стрижнів одного полюса. Механічний момент прикладається до окремих ТКЕ, які з'єднують між собою різні стрижні полюса.

На рис. 3 в градієнті сірого кольору (на рисунку надана шкала відтінків з позначками відповідних значень термомеханічних напружень в МПа) показано термомеханічні напруження для варіанту  $\varepsilon = 0,74$ ,  $s = 0$ . Також показано термомеханічні деформації ТКЕ, які

для наочності гіперболізовані в 500 разів і відображають форму і вигин ТКЕ в результаті деформування. З рис. 3 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 зварювання стрижнів в 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 вели-

чини 223 МПа. Після зупинки ЯСМ зазначені зламні зусилля зникають, але надалі циклічно повторюються при кожному вклученні машини. Навіть якщо ці напруження не перевищують критичних значень, то в процесі експлуатації поступово накопичуються втомні деформації матеріалу і відбувається руйнація ДСР.



Рис. 3. Деформація елементів ДСР СГ-500

На рис. 4 показано розподіли ТМН в стрижнях і ТКЕ для гідрогенератора СГК 538/160–70М, за наявності СЕ ротора величиною  $\epsilon = 0,83$  (при  $s = 0$ ). На рисунку для наочності показані збільшення в 200 разів деформації, які відображають просторову форму і вигин ТКЕ в результаті деформування.

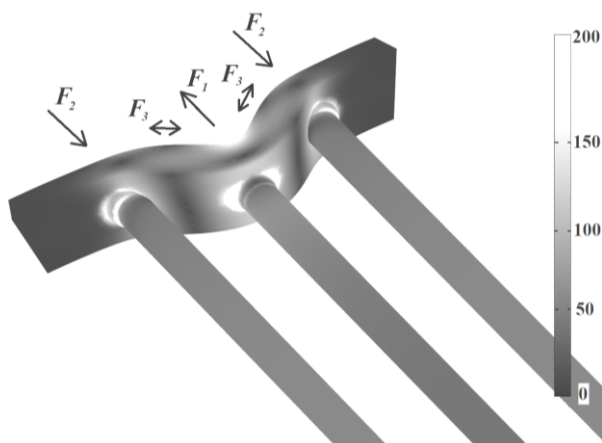


Рис. 4. Деформація елементів ДСР СГК 538/160–70М

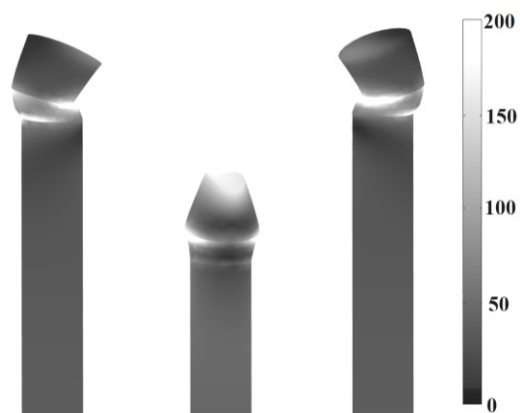


Рис. 5. Деформація стрижнів ДСР СГК 538/160–70М

На рис. 5 в збільшеному масштабі показано загальний вигляд деформованих стрижнів ДСР гідрогенератора СГК 538/160–70М, а також розподіл в них термомеханічних напружень.

З рис. 4 і рис. 5 видно суттєву відмінність довжин крайніх і середнього стрижнів внаслідок їх різного нагріву. Зазвичай стрижні і ТКЕ з'єднуються між собою зварюванням і термомеханічні зусилля в значній мірі впливають на зварний шов. На величину сумарних ТМН в стрижнях впливають не тільки аксіально направлені сили, але й поперечні сили в ТКЕ. Всі термомеханічні сили, можна розділити на 3 складові:

1) аксіальна сила, що діє на відрив центрального стрижня від ТКЕ (сила  $F_1$ , яка показана на рис. 4). Ця сила створює складову ТМН величиною до 151 МПа при СЕ  $\epsilon = 0,83$ , причому механічні напруження в межах поперечного перерізу центрального стрижня розподілені відносно рівномірно. Повна сила на розрив, що діє на центральний стрижень, у даному випадку складає 2,07 тони.

2) аксіальна сила стискування, що прикладена до крайніх стрижнів (сила  $F_2$  на рис. 4). Ця сила при  $\epsilon = 0,83$  в кожному з крайніх стрижнів створює локальні ТМН величиною до 297 МПа, які майже в 2 рази перевищують ТМН в центральному стрижні, але розподілені по перерізу крайніх стрижнів нерівномірно (на рис. 4 і рис. 5 ділянки з великим значенням ТМН зафарбовані в білі кольори). Хоча повна сила на кожен крайній стрижень є приблизно в 2 рази меншою, ніж сила, прикладена до центрального стрижня, але саме завдяки більшій величині ТМН на локальних зазначених ділянках крайніх стрижнів руйнація матеріалу може починатися саме з них. Про це свідчать результати обстежень ушкоджених стрижнів ДСР СГК 538/160–70М.

3) сила поперечного розтягування ТКЕ внаслідок різного подовження усіх стрижнів полюса, яка діє в напрямку дуги сектора ТКЕ (сила  $F_3$  на рис. 4) і призводить до вигину ТКЕ, привареного до кінців усіх стрижнів. Ця сила розриває ТКЕ і також впливає на руйнацію ДСР.

При появі великих значень СЕ (від  $\epsilon = 0,50$  до  $\epsilon = 0,83$ ) спостерігаються значні величини термомеханічних напружень в ТКЕ полюса (від 218 до 603 МПа), найбільші значення яких перевищують межі плинності і міцності міді.

Причиною таких ушкоджень є, з одного боку, поява СЕ ротора внаслідок тривалої експлуатації машини, а з іншого боку – невдала конструкція ДСР СГК 538/160–70М, оскільки саме наявність непарної (три) кількості стрижнів на полюсі в зазначеній конструкції призводить до виникнення умов прискореної руйнації ДСР. З цієї точки зору інша конструкція ДСР в СГ-500, яка має парну (шість) кількість стрижнів на полюсі, є більш стійкою до негативного впливу дії СЕ.

Таким чином, не зважаючи на відмінності конструкції ДСР різних ЯСМ, закономірності фізичних процесів, причини і механізм ушкодження ДСР при виникненні СЕ мають загальний характер і потребують розробки багато в чому однотипних технічних рішень для зменшення їх негативного впливу. До таких технічних рішень можна віднести: виконання

парної кількості стрижнів на полюсі, зменшення нерівномірності розподілу струмів і нагріву стрижнів за рахунок виконання крайніх стрижнів з більшою площею перерізу, компактне відносно повздовжньої осі розташування стрижнів на полюсі тощо.

**Висновки.** Збільшення випадків uszkodження демпферної системи ротора потужних ЯСМ потребує системного дослідження і розробки рекомендацій щодо удосконалення конструкції ДСР.

Тривимірне математичне моделювання розподілу індукованих струмів, температури і термомеханічних напружень в елементах ДСР дозволило докладно дослідити причини і механізм uszkodження ДСР при появі статичного ексцентриситету ротора або при виникненні тривалого асинхронного режиму роботи. Тривимірна модель дозволяє виявити ділянки з найбільшими значеннями ТМН.

Доведено, що першопричиною процесів деградації і uszkodження ДСР ЯСМ є нерівномірність розподілу індукованих струмів в стрижнях на полюсах ротора, яка виникає при появі СЕ ротора або при роботі машини в асинхронному режимі. Найбільші за величиною індуквані 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 поздовжньо-поперечної деформації ДСР і появи значних термомеханічних напружень в елементах ДСР. Ці напруження суттєво залежать від наявної величини ексцентриситета ротора і поточного ковзання ротора в асинхронному режимі. При значних ковзаннях і ексцентриситеті виникають неприпустимо великі зламні зусилля, які розривають стрижні і ТКЕ ДСР.

Важливим є також подальша розробка і удосконалення методів та засобів точного контролю величини статичного ексцентриситета, який є однією з голов-

них причин uszkodження ДСР, а також техніко-конструктивних заходів щодо термінового усунення СЕ.

#### Список літератури

- 1 Артюх С.Ф., Урманов О.Б. *Статистический анализ отказов электрооборудования на гидроэлектростанциях каскада киевских ГАЭС-ГАЭС. Вісник ХПИ, 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 ексцентриситету ротора на демпферну обмотку капсульного гідрогенератора потужністю 23 МВА.* Гідроенергетика України. – 2020. – № 1-2. – С. 59-64.
- 4 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.* Przegląd Elektrotechniki (Electrical Review), R. 88, № 5b, 2012, pp. 97-100.

#### References (transliterated)

- 1 Artyuh S.F., Urmanov O.B. *Statisticheskiy analiz otkazov elektrooborudovaniya na gidroelektrostantsiyah kaskada kievskikh GES-GAES* [Statistical analysis of electrical equipment failures at hydro-power plants of the Kiev HPP-PSPP cascade]. Visnik HPI, 2011. 41. pp. 3-7.
- 2 Vaskovskiy Yu.M., Tsivinskiy S.S., Titko O.I. *Elektromagnitni protsesi u dempferniy sistemі rotoriv gidrogeneratoriv pri nerivnomirnosti povitryanogo promizhku* [Electromagnet processes in damper systems of rotors in hydrogenerators in case of uneven power supply]. Tehnichna elektrodinamika, 2015. 1. pp. 65-71.
- 3 Vaskovskiy Yu.M., Geraskin O.A. *Vpliv ekstsentrismetu ratora na dempfernu obmotku kapsulnogo gidrogeneratora potuzhnistyu 23 MVA* [Injection of the eccentricity of the rotor to the damper winding of the capsule hydrogenerator with a pressure of 23 MVA] Gldroenergetika UkraYini. – 2020. – 1-2. – pp. 59-64.
- 4 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.* Przegląd Elektrotechniki (Electrical Review), R. 88, 5b, 2012, pp. 97-100.

Надійшла (received) 27.09.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Authors

**Васковський Юрій Миколайович (Васковський Юрій Николаевич, Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1262-0939>; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Гераскін Олександр Анатолійович (Гераскін Александр Анатольевич, Geraskin Alexandr Anatolievich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4651-4579>; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).

**Татарінов Костянтин Михайлович (Татаринов Константин Михайлович, Tatarinov Konstantin Mikhailovich)** – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; e-mail: [tarantino@gmail.com](mailto:tarantino@gmail.com).