



МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В ДЕМПФЕРНІЙ ОБМОТЦІ КАПСУЛЬНОГО ГІДРОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОЯВІ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА

Методами математичного моделювання досліджено тривимірний розподіл термомеханічних напружень у стержнях демпферної обмотки ротора капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160–70М при наявності характерного дефекту – статичного ексцентриситету ротора. Показано, що при великих значеннях ексцентриситету в стержнях ротора спостерігаються суттєво нерівномірно розподілені термомеханічні напруження, значення яких є небезпечними і сприяють швидкій руйнації демпферної обмотки ротора.

К л ю ч о в і с л о в а: гідрогенератор, uszkodження, ексцентриситет, демпферна обмотка, термомеханічні напруження.

Актуальність теми. Капсульні гідрогенератори (ГГ) потужністю 23 МВА типу СГК 538/160–70М тривалий час знаходяться в експлуатації на Київській і Канівській ГЕС Дніпровського каскаду.

Накопичений досвід експлуатації зазначених ГГ показав, що одним з характерних видів їх uszkodження є відрив стержнів демпферної обмотки (ДО) від сегментів короткозамикаючих кілець (СКК) на полюсах ротора, що призводить до значних аварійних наслідків. У попередніх роботах авторів проаналізовано фізичні процеси в ДО ГГ і показано, що першопричиною руйнації ДО є нерівномірний розподіл струмів і відповідно нерівномірний нагрів стержнів ДО, який виникає при роботі ГГ в асинхронному режимі або при появі ексцентриситету ротора. Особливо небезпечним для ДО є ексцентриситет ротора.

Для ГГ більш характерним є статичний ексцентриситет (СЕ) ротора, при якому повздожні вісі статора і ротора паралельні одна одній і є взаємно перпендикулярними, на відміну від динамічного ексцентриситету, коли вісі статора і ротора не співпадають, є паралельними одна одній, однак вісь ротора (разом з ротором) обертається навколо вісі статора. Поява ексцентриситету може призводити до механічного uszkodження не тільки стержнів ДО, але й пакетів електротехнічної сталі ротора і статора через тертя ротора об осереддя статора.

Оскільки зазначені uszkodження суттєво впливають на працездатність ГГ, дослідження причин і наслідків руйнації ДО є актуальною науково-технічною задачею. Дана стаття продовжує викладення результатів досліджень авторів за зазначеною тематикою, започаткованих у попередніх роботах [1–3].

Мета досліджень. Метою досліджень є уточнення результатів моделювання термомеханічних напружень в ДО ГГ та їх аналіз при виникненні СЕ ротора з використанням нової тривимірної польової математичної моделі.

Об'єкт дослідження. Дослідження проводилися на прикладі капсульного ГГ СГК 538/160–70М, який експлуатується на Київській ГЕС і має наступні

характеристики: напруга статора – 6,3 кВ; струм статора – 2070 А; $\cos \varphi = 0,974$; ККД = 96,1%; напруга ротора – 390 В; струм ротора – 1040 А; кількість полюсів – 70; частота обертання – 85,7 об/хв; односторонній повітряний проміжок під серединою полюса становить $\delta = 6$ мм.

На кожному полюсі ротора ДО представляє собою сектор "білячої клітки" що складається з 3-х мідних стержнів діаметром 17,5 мм і довжиною 1,653 м. Між частиною стержня, що розташована в пазу і СКК існує частина стержня, що охолоджується повітрям довжиною 40 мм. Між СКК кожного полюса ротора встановлено міжполюсні електричні з'єднання, тобто ДО має поздовжньо-поперечний тип конструкції. Межа плинності міді стержнів ротора становить $\sigma_{пл_Cu} = 280$ МПа, а межа міцності – $\sigma_{міц_Cu} = 390$ МПа.

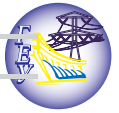
Математична модель. При проведенні досліджень для аналізу електромагнітного і теплового полів ГГ, а також для визначення розподілу індукованих струмів у стержнях і елементах СКК ДО з використанням програми National Instruments Multisim використана математична модель, яка докладно описана в попередній статті авторів [1].

Відмінність даного моделювання полягає в роботі і використанні замість двовимірної математичної моделі напружено-деформованого стану ДО в межах одного полюса польової тривимірної математичної моделі, яка базується на системі диференціальних рівнянь у часткових похідних стаціонарних задач структурної механіки. В загальному вигляді ця система рівнянь має наступний вигляд:

$$\nabla \cdot DS + \vec{F} = 0, \quad D = \nabla u + I,$$

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

Для аналізу величини механічних напружень використовується тензор механічного напруження за



Таблиця. Значення ексцентриситету ротора ГГ.

Параметр	Значення параметра					
$\Delta\delta$, мм	0	1	2	3	4	5
δ_{\max} , мм	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
δ_{\min} , мм	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
ε	0	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83

Мізесом (ТМН), який характеризує усереднене значення механічних напружень, що виникають в одиниці об'єму матеріалу під впливом спільної дії сил різного просторового напрямку і різної фізичної природи.

Чисельна реалізація математичної моделі виконана методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу Comsol Multiphysics. Вважається, що ГГ працює в синхронному режимі при номінальному навантаженні, однак має ушкодження ротора – СЕ. При розрахунках вважалось, що частина стержня, розміщеного в пазу полюсного наконечника, є рухомою тільки в аксіальному напрямку.

Величина СЕ ротора характеризується коефіцієнтом відносного ексцентриситету, що описується формулою:

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

де δ_{\max} , δ_{\min} – максимальне і мінімальне значення повітряного проміжку, відповідно. Коефіцієнт відносного ексцентриситету змінюється в межах від 0 ($\delta_{\max} = \delta_{\min}$ – відсутність ексцентриситету) до $\varepsilon = 0,83$ ($\delta_{\min} = 1$ мм), як показано в Табл. 1.

Результати досліджень. Результати досліджень розподілу струмів і нагріву стержнів ДО при появі СЕ наведені в роботі [1]. У даній статті увага зосереджена на уточненому визначенні величин термомеханічних напружень в елементах ДО, які безпосередньо викликають руйнацію ДО.

Конструкція ДО капсульного ГГ типу СГК 538/160–70М з точки зору її стійкості до появи СЕ є досить невдалою. На кожному полюсі ротора зазначеного ГГ міститься три стержня, причому з появою СЕ індуквані струми протікають тільки в крайніх стержнях, а в центральному стержні струми відсутні. Тому центральний стержень залишається “холодним”, а крайні стержні є “гарячими”, що спричиняє максимальний перепад температури і термомеханічних напружень в елементах ДО.

На Рис. 1 показано змінення максимального термомеханічного напруження в СКК полюса при збільшенні величини СЕ ротора ГГ в межах $\varepsilon = 0 \dots 0,83$.

З Рис. 1 видно, що при появі великих значень СЕ ротора (від $\varepsilon = 0,50$ до $0,83$) спостерігаються значні величини максимальних термомеханічних напружень в СКК полюса (від 218 до 603 МПа), найбільші значення яких суттєво перевищують межі плинності і міцності міді стержнів ротора ДО. Внаслідок цього виникає значна термомеханічна деформація стержнів і СКК ДО, що збільшує

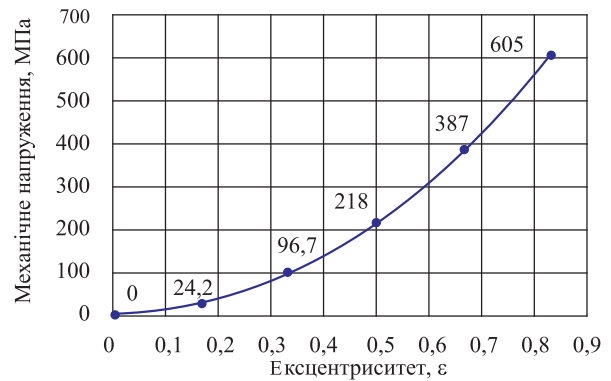


Рис. 1. Залежність максимального термомеханічного напруження в СКК від СЕ ротора.

вірогідність відриву стержнів від короткозамикаючих кілець ДО.

На Рис. 2–4 (червоні кольори відповідають більшим значенням ТМН) показано тривимірні розподіли термомеханічних напружень у СКК і стержнях ДО за наявності СЕ ротора з $\varepsilon = 0,83$. На цих рисунках показано для наочності гіперболізовані (збільшені) в 200 разів термомеханічні деформації стержнів і СКК ДО полюса, які відображають просторову форму їх вигину.

На Рис. 2 показано ДО з внутрішньої сторони (з боку осердя полюса), а на Рис. 3 показано ДО і відповідні термомеханічні напруження з торця полюса. На Рис. 4 показано розподіл термомеханічних напружень у виступаючих з паза частинах стержнів ДО і в частинах стержнів, що знаходяться всередині

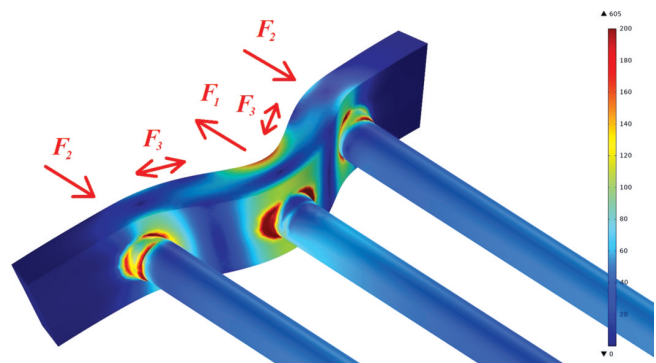


Рис. 2. Розподіл термомеханічних напружень в СКК і стержнях ДО за наявності СЕ ротора $\varepsilon = 0,83$ (вигляд з боку осердя полюса).

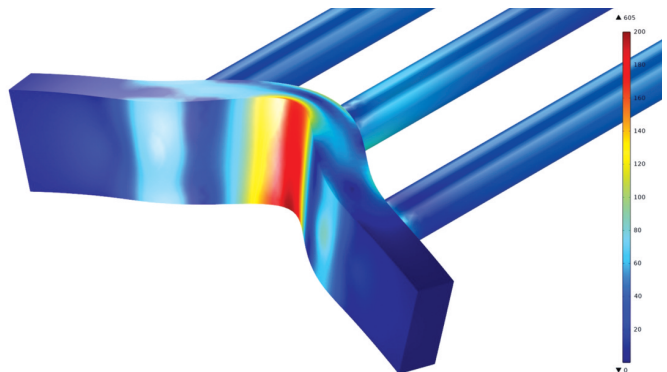


Рис. 3. Розподіл термомеханічних напружень в СКК і стержнях ДО за наявності СЕ ротора $\varepsilon = 0,83$ (вигляд з торця полюса).

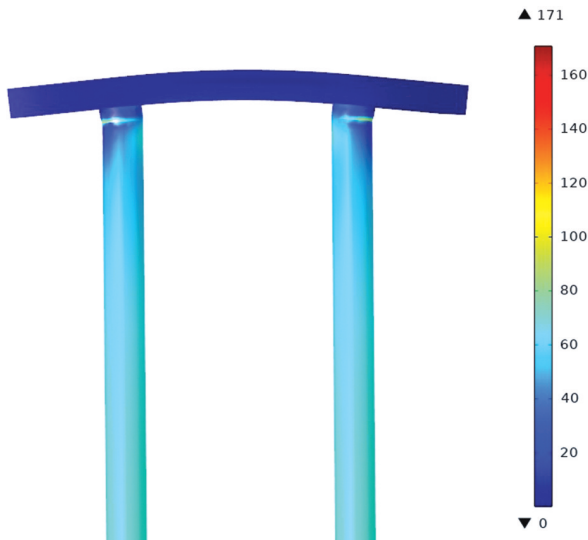


Рис. 4. Розподіл термомеханічних напружень у виступаючих із паза частинах стержнів ДО і в частинах стержнів, що знаходяться всередині СКК за наявності СЕ ротора ГГ $\varepsilon = 0,83$.

СКК, за наявності СЕ ротора ГГ $\varepsilon = 0,83$. Для наочності СКК видалені із зображення. З Рис. 4 видна суттєва відмінність довжини крайніх і середнього стержнів внаслідок їх різного нагріву. Зазвичай стержні і СКК з'єднуються між собою зварюванням, і термомеханічні зусилля в значній мірі впливають на зварний шов. На величину сумарних термомеханічних напружень у стержнях ДО впливають не тільки аксіально направлені сили, але й поперечні сили в короткозамикаючому кільці.

Усі сили термомеханічного походження, що виникають у стержнях і СКК ДО, можна розділити на 3 складові:

1) аксіальна сила, що діє на відрив центрального стержня від короткозамикаючого кільця ДО (сила F_1 , яка показана на Рис. 2). Ця сила створює складову ТМН значенням до 151 МПа при СЕ $\varepsilon = 0,83$, причому механічні напруження в межах поперечного перерізу центрального стержня розподілені відносно рівномірно, про що свідчить характер наванта-

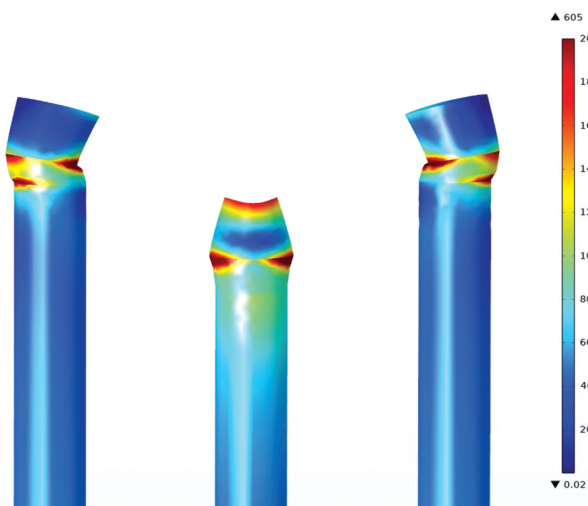


Рис. 5. Розподіл термомеханічних напружень у двостержневій ДО за наявності СЕ $\varepsilon = 0,83$.

ження на Рис. 3. Повна сила на розрив, що діє на центральний стержень, складає 2,07 тонни.

2) аксіальна сила стискування, що прикладена до крайніх стержнів (сила F_2 на Рис. 2), подовжених через їх нагрів. Ця сила при СЕ $\varepsilon = 0,83$ в кожному з крайніх стержнів створює локальні максимальні термомеханічні напруження до 297 МПа, які майже в 2 рази перевищують ТМН у центральному стержні, але розподілені по перерізу крайніх стержнів суттєво нерівномірно. Хоча інтегральна сила, що діє на кожен крайній стержень приблизно в 2 рази менша, ніж інтегральна сила, прикладена до центрального стержня, але саме завдяки більшій величині локальної ТМН на окремих ділянках крайніх стержнів руйнація матеріалу ДО починається саме з них. Про це свідчать результати обстежень зруйнованих ДО ГГ типу СГК 538/160–70М;

3) сила розтягування СКК внаслідок різного подовження всіх стержнів полюса, яка діє в напрямку дуги сектора короткозамикаючого кільця ДО (сила F_3 на Рис. 2) і призводить до вигинання СКК, привареного до кінців усіх стержнів ДО (Рис. 4). Ця сила розриває СКК і є також важливим фактором руйнації ДО, оскільки вірогідність ушкодження стержнів збільшується.

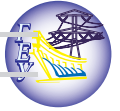
Спільна дія всіх трьох різнонаправлених у просторі сил призводить до складного термомеханічного процесу пошкодження ДО ГГ внаслідок появи великих локальних значень ТМН в стержнях та СКК.

Як було зазначено, причиною таких ушкоджень є, з одного боку, поява СЕ ротора ГГ, а, з іншого, невдала конструкція ДО конкретно ГГ типу СГК 538/160–70М, оскільки саме наявність непарної кількості (трьох) стержнів на полюсі в зазначеній конструкції призводить до виникнення умов швидкої руйнації ДО.

Для порівняння на Рис. 5 наведена картина розподілу ТМН для уявного варіанту конструкції ДО на полюсі, яка містить тільки два стержня. В такій симетричній конструкції ДО зникають причини швидкого її пошкодження у разі появи ексцентриситету ротора. Відомо, що вибір параметрів ДО залежить і від інших факторів, наприклад, електромагнітного моменту, який може створити ДО в асинхронному режимі. Наведений фактор потрібно обов'язково враховувати для створення ДО, стійких до появи СЕ.

Так, наприклад, кількість стержнів ДО на полюсі може дорівнювати чотирьом, але, загалом, у будь-яких конструктивних варіантах їх кількість повинна бути парною для уникнення стержня, розташованого в центрі полюса.

Таким чином, тривимірне математичне моделювання термомеханічних напружень в елементах ДО дозволило детально дослідити причини і механізм руйнування ДО при появі СЕ ротора. Триви-



мірна модель дозволяє виявити ділянки з найбільшими значеннями ТМН і надалі запропонувати конструктивно-технологічні заходи щодо запобігання обриву стержнів ДО полюса.

Висновки. 1. Розроблено польову тривимірну математичну модель напружено-деформованого стану ДО капсульного гідрогенератора SGK 538/160–70М, яка дозволяє визначити термомеханічні деформації ДО, що з'являються внаслідок появи СЕ ротора ГГ.

2. Показано, що наявність трьох стержнів на полюсі ротора даного ГГ спричиняє інтенсивні процеси пошкодження ДО. Тому подальша модернізація

конструкції ДО повинна бути направлена на створення парної кількості стержнів на кожному полюсі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Васьковський Ю.М., Гераскін О.А. Вплив ексцентриситету ротора на демпферну обмотку капсульного гідрогенератора потужністю 23 МВА // Гідроенергетика України. – 2020. – № 1-2. – С. 59–64.

2. Васьковський Ю.М., Гераскін О.А. Температурне поле синхронної машини при короткому замиканні витків обмотки збудження // Гідроенергетика України. – 2017. – № 1,2. – С. 56–59.

3. Васьковський Ю.М., Цивінський С.С., Тутко О.І. Електромагнітні процеси в демпферній системі роторів гідроенергетичних машин при нерівномірності повітряного проміжку // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 1. – С. 65-71.

Vaskovskii Yu.M., Geraskin O.A., Tatarinov K.M.

SIMULATION OF THERMOMECHANICAL STRESSES OF THE DAMPER WINDING OF CAPSULAR HYDROGENERATOR WHEN THE ROTOR ECCENTRICITY APPEARS

The three-dimensional distribution of thermomechanical stresses in the damper winding rods of the capsular hydrogenerator (type SGK 538/160–70M) rotor in case of characteristic defect (static eccentricity of the rotor) is studied by mathematical modeling. It is shown that at large values of eccentricity in the rotor rods there are significantly unevenly distributed thermomechanical stresses, the values of which are dangerous and contribute to the rapid destruction of the damper winding of the rotor.

Key words: hydrogenerator, damages, eccentricity, damper winding, thermomechanical stresses.

© Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., Татарінов К.М., 2020

