

УДК 621.313.322-82

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.13

П. М. МАКАРОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФОРМИ РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА

Об'єктом дослідження у статті є технологія зміни форми ротора в процесі експлуатації гідроагрегатів. **Предметом** вивчення в статті є конструкція та геометричний стан форми ротора з неправильною геометрією гідрогенераторів-двигунів. **Метою** є постановка тривимірного механічного розрахунку сегменту ротора для подальшого застосування під час тензометричних випробувань. **Задачі:** дослідити особливості технології відновлення форми ротора; сформулювати основні допущення для тривимірного механічного розрахунку деформацій ротора при угонній частоті обертання; провести тривимірний розрахунок переміщень ротора з урахуванням основних зусиль, що припадають на полюсне з'єднання, які отримані за допомогою класичних методик. Використовуваними **методами** є: метод скінченних елементів математичного моделювання термонапруженого стану вузлів. Отримано наступні **результати:** подано детальний опис технологічного процесу відновлення форми ротора методом гарячого розклинювання. Розроблено тривимірні моделі сегменту ротора та виконано тривимірний механічний розрахунок даної моделі, в результаті чого отримано задовільні значення переміщення ротору гідрогенератора при угонній частоті обертання, з врахуванням технології відновлення. Для реконструкції обода ротора необхідно нагріти обід ротора до перепаду температур між ободом і остовом не менше 60 °С. Далі виконується гаряче розклинювання обода ротора із забиванням кожного із забивних клинів на однакову величину, що забезпечує створення необхідного діаметрального натягу між ободом і остовом ротора та уникнення зміщення обода ротора відносно остова. Контроль цього процесу здійснюється за допомогою тензорезисторів. При необхідності потрібно охолодити обід ротора до вирівнювання температур обода і остова ротора. **Висновки.** Наукова новизна полягає у комбінованому підході до оцінки деформації обода ротора після відновлення його форми, що включає в себе елементи аналітичного механічного розрахунку та розрахунку у тривимірній постановці. Представлена технологія процесу відновлення ротора відповідає вимогам Європи.

Ключові слова: гідрогенератор; ротор; повітряний зазор; розклинювання полюсів; міцністний розрахунок.

Вступ

Останні десятиліття характеризуються популяризацією використання альтернативних джерел виробництва електроенергії. Серед найбільших перспективних напрямків є використання гідроакмулюючих електростанцій, які є основним джерелом покриття пікових навантажень та традиційно є аварійними резервами країн [1].

Основною особливістю ГАЕС є використання гідрогенераторів-двигунів, які працюють у двох режимах та передбачають більшу кількість пусків і зупинок, ніж звичайні генератори. Ще однією особливістю таких гідроагрегатів є оборотність, тобто залежність обертання ротора від режиму роботи: насосний (двигун) або генеруючий (генератор).

Найбільші генератори-двигуни потужністю 700 МВт, виготовлені фірмою «Alstom Power», встановлені на ГЕС Гренд-Кулі (США), ГЕС Ітайпу (Бразилія-Парагвай), а останніми роками на ГЕС Guri II (Венесуела) та ГЕС «Три ущелини» (Китай). Великі су-

часні агрегати різних типів виготовляють також фірми «ABB», «Voith Siemens», «Tech Hydro», «Toshiba», АТ «Українські енергетичні машини» та ін. [2]. В таблиці 1 наведені основні параметри великих гідрогенераторів-двигунів.

Усі існуючі гідрогенератори-двигуни виконуються або парасолькового типу, або підвісного. Гідрогенератор-двигун, що розглядається у роботі, має парасолькове виконання з опорою підп'ятника на нижню хрестовину, при цьому підп'ятник і нижня хрестовина входять до складу насос-турбіни. Направляючий підшипник гідрогенератора-двигуна розташований у верхній хрестовині, а в нижній хрестовині напрямний підшипник відсутній (рис. 1).

В основі проектування гідрогенераторів лежить концепція вузлового складання агрегату на станції.

У процесі збирання дуже важливо зберегти форму обода ротора у вигляді кола. Спотворення форми ротора може призвести до аварій із зачепленням ротора за статор, руйнуванням полюсів та обмоток статора [3], а також до зміни величини повітряного за-

зору у радіальному та осьовому напрямках і як наслідок демпферна система, що розташована у полюсах ротора, зазнає значних перевантажень [4]. Відомо також, що нерівномірність повітряного зазору гідрогенератора викликає значні вібрації гідроагрегату і, як наслідок, призводить до появи додаткових втрат на поверхні полюсів [5, 6].

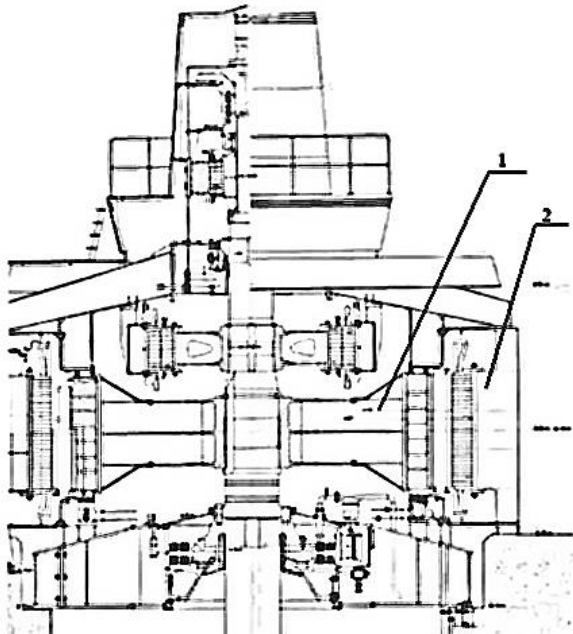


Рис. 1. Загальна конструкція гідрогенератора-двигуна:
1 – ротор; 2 – статор

ють відновлення форми ротора за допомогою спеціальної технологічного процесу збірки.

Варто відзначити, що процес відновлення ротора є складним, довготривалим та потребує додаткових міцністних розрахунків через властивості матеріалів конструкційних елементів ротора.

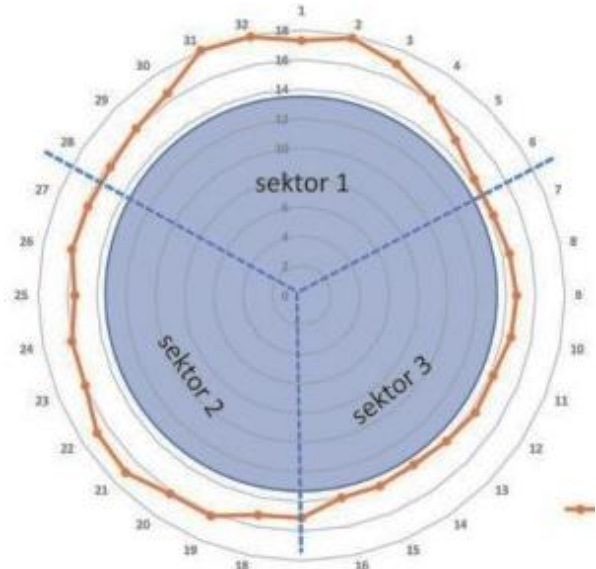


Рис. 2. Картина зміни форми ротора гідроагрегату

На рис. 3 представлена секція тривимірної моделі ротора. Варто звернути увагу, що позиції 2 і 3 є суцільнометалевими. При цьому номінальний модуль пружності для листового прокату для сталі Ст3 (аналог європейської сталі) становить $2,1 \cdot 10^{11}$ МПа для спрямування як вздовж, так і впоперек прокату, що відрізняється від реального значення модуля пружності обода ротора (6).

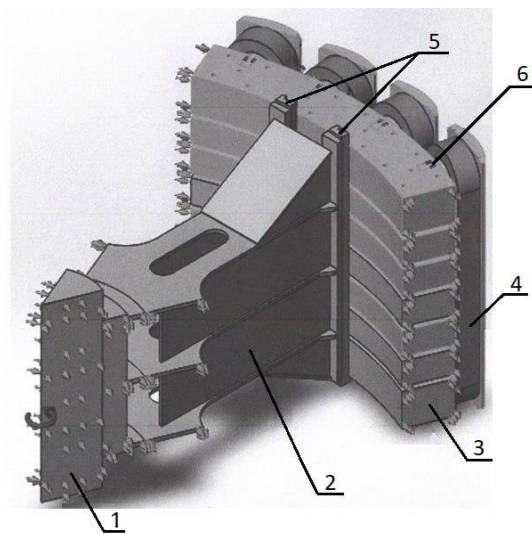


Рис. 3. Секція тривимірної моделі ротора:
1 – вал; 2 – спиця; 3 – пакет обода; 4 – полюс;
5 – клини обода; 6 – клини полюса

Таблиця 1

Основні параметри гідрогенераторів-двигунів

Назва ГАЕС (країна)	Потужність, МВт		Коефіцієнт потужності	Частота обертання, об/хв
	режим двигуна	режим генератора		
Жарновицька (Польща)	210	177	0,94	166,7
Ташлицька (Україна)	211	160	0,95	136,4
Дністровська (Україна)	424	324	0,9	150,0
Shin Toyne (Японія)	234	230	0,95	257,0
Tanbaga (Японія)	310	300	0,90	429,0
Bath County (США)	350	350	0,90	257,14
Raccoon Mountain (США)	475	383	0,90	300

На рис. 2 представлена реальна картина зміни форми ротора у процесі експлуатації гідроагрегату.

Згідно з вимогами ДСТУ EN IEC 60034-33:2022 [7] гідрогенератори з такими відхиленнями потребу-

Технологія відновлення конструкції ротора

Для забезпечення надійної роботи гідроагрегату та зменшення його вібрації існує два способи відновлення форми ротора:

- 1) центрування шляхом зміщення валу гідроагрегату;
- 2) переклинювання ротора.

На практиці, з метою оптимізації ремонту гідроагрегатів, використовують другий спосіб, а саме гарячу розклинку обода ротора. При цьому важливо дотримуватися температурної різниці між ободом та остовом ротора, яка складає $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також забезпечити величину діаметрального натягу (4 мм) обода щодо відносно остову [7]. На рис. 4 стрілками позначено напрямок діючих сил при гарячому заклинюванні.

Розглянемо детальніше процес відновлення форми ротору методом гарячого переклинювання.

На початку ведуться підготовчі роботи з виготовлення нових забивних клинів обода ротора із забезпеченням припуску на подальше доопрацювання за результатами вимірювання фактичних розмірів пазів під установку клинів в обід і остові ротора.

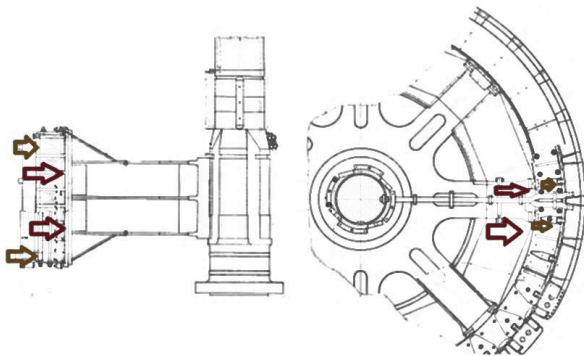


Рис. 4. Напрямок зусиль при заклинюванні ротора

Креслення забивного клину наведено на рис. 5.

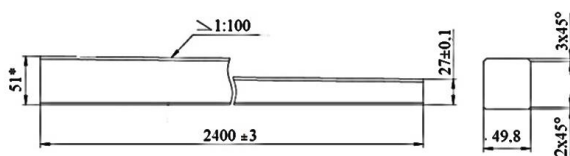


Рис. 5. Креслення клину ротора

Далі встановлюються тумби-підставки під обід ротора та спиці для рівномірного розташування U-подібних електронагрівачів по колу у вентиляційні канали, потужністю по $0,9\text{ кВт}$ (рис. 6).^o

Нагрів обода необхідно здійснити до мінімального перепаду температур між ободом і спицями

остову, для забезпечення демонтажу забивних клинів.

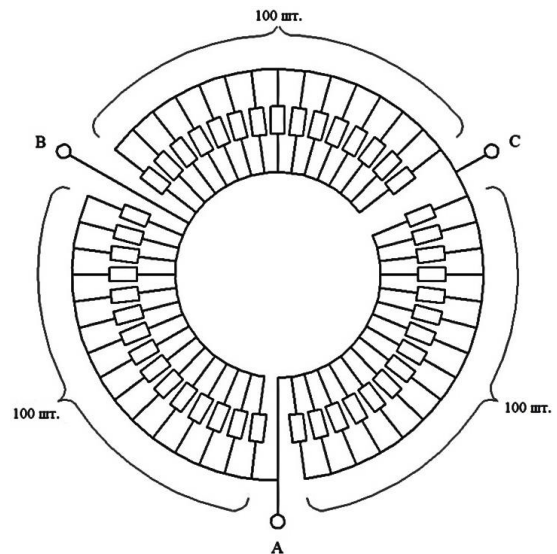


Рис. 6. Схема з'єднання електронагрівачів

Для демонтажу старих клинів піднімаються вгору всі забивні клини (по два на кожній спиці), потім виймаються по одному на кожній спиці, а вісім клинів фіксуються від опускання. Далі охолоджується обід ротора до вирівнювання температур обода і остова ротора, перевіряється стан клинових смуг і пазів обода. Для забезпечення точності виготовлення нових клинів, знімається паспорт розмірів пазів під клини в обід і в клинових смугах остова. Точність всіх вимірювань становить $0,1\text{ мм}$.

Положення ротора під час переклинювання і до закінчення робіт не можна змінювати.

Далі ведеться підготовка та зачистка до шорсткості $Ra\ 2,5$ майданчика на спицях ротора для установки тензорезисторів (рис. 7).

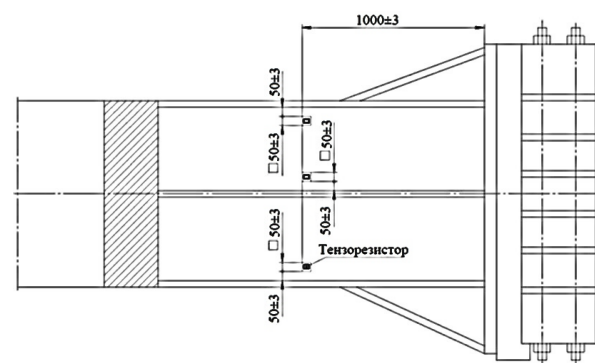


Рис. 7. Установка тензорезисторів

Тензометричні вимірювання нульових величин механічних напружень у спицях виконується шляхом наклеювання тензорезисторів на спиці.

Наступним кроком є видалення старих клинів, встановлення нових забивних клинів у вільні пази з попереднім забиттям клинів "нахолодно" до зникнення зазорів. При цьому проводиться замір отриманих механічних напружень у спицях.

Для виконання остаточної теплоізоляції обода ротора необхідно нагріти обід ротора до перепаду температур між ободом і остовом не менше 60 °С. Далі виконується гаряче розклинювання обода ротора із забиванням кожного із забивних клинів на однакову величину, що забезпечує створення необхідного діаметрального натягу між ободом і остовом ротора та уникнення зміщення обода ротора відносно остову. Контроль цього процесу здійснюється за допомогою тензорезисторів. При необхідності потрібно охолодити обід ротора до вирівнювання температур обода і остова ротора.

Виступаючі кінці забивних клинів обрізаються, виконується приварювання забивних клинів до клинових смуг. При цьому рекомендується залишити зверху максимально можливу довжину клину для забезпечення можливості додаткового забиття клинів в ході подальших капітальних ремонтів гідрогенераторів-двигунів. Далі демонтуються електронагрівачі та елементи теплоізоляційного укриття.

Для забезпечення необхідного натягу в клинах та тензометричних вимірювань потрібно попередньо виконати тривимірний механічний розрахунок.

Допущення тривимірного розрахунку

Актуальною проблемою є моделювання пластичних властивостей високолегованих листів сталі обода ротора, які відрізняються від металів, які використовуються класично, тим, що виявляють анізотропію властивостей, тобто кожному напрямку відповідає своя діаграма деформування, яка, крім того, залежить від компонента напруженого стану.

Як сформулював С. П. Тимошенко [8], «Основне завдання теорії пружності полягає в тому, щоб по заданим зовнішнім силам, що діють на тверде тіло, знаходити ті зміни форми, яке тіло зазнає, і ті внутрішні сили пружності, які при цих змінах форми виникають між частинами тіла». При розгляді «гіпотетично ідеального пружного тіла» передбачається, що:

- середовище заповнює тіло суцільним чином і не змінює свою безперервність у процесі деформування при додатку навантажень;

- виділений із тіла елемент будь-якої дрібниці має ті ж самі властивості, як і тіло загалом. Атоміс-

тична структура речовини не враховується, а механічні властивості тіла в будь-якій його точці вважаються однаковими;

- початкові деформації та напруження в тілі дорівнюють нулю.

Однак при детальному розгляді обода ротора видно, що реальна картина суттєво відрізняється від ідеальної. Створюється попередній технологічний натяг, який повинен забезпечувати компенсацію деформації відцентрових сил елементів, розташованих на роторі.

В основних постулатах теорії міцності розглядаються такі допущення:

- деформації та переміщення малі в порівнянні з розмірами тіла і є безперервними функціями координат. Переміщення тіла як твердого, при якому не змінюються його форма та розмір, відбувається за відсутності деформацій;

- переміщення точок конструкції в пружній стадії роботи матеріалу прямо пропорційні силам, що викликають ці переміщення;

- лінійна залежність між деформаціями та напруженням (закон Гука).

З гіпотез випливає:

- ідеальна гнучкість, коли відбувається повне зникнення деформацій після зняття навантаження; тобто тіло здатне відновлювати свою первісну форму і розміри після усунення причин, що викликали його деформацію;

- напружено-деформований стан тіла не залежить від порядку застосування навантажень;

- адитивність дії навантажень – напружено-деформований стан тіла від суми навантажень дорівнює сумі напружень і деформацій від складових навантажень; цю властивість називають ще принципом суперпозиції;

- при заданих зовнішніх навантаженнях і крайових умовах тіло перебуває в рівновазі – існує єдина рівноважна система напружень та переміщень;

- справедливий принцип Сен-Венана: врівноважена система сил, прикладена до деякої частини твердого тіла, викликає в ньому напруження, що дуже швидко зменшуються в міру віддалення від цієї частини й на відстанях, що істотно перевищують найбільший лінійний розмір області застосування навантажень, напруження й деформації виявляються зневажливо малими.

Це дозволяє сили, прикладені на невеликій ділянці, замінити статично еквівалентною системою сил, що діє на тій же ділянці, що призводить лише до зміни напружено-деформованого стану в малій околиці даної ділянки. Під нелінійністю мається на увазі:

- геометрична нелінійність при великих деформаціях при збереженні закону Гука;
- фізична нелінійність, яку вивчають теорія пластичності про властивості тіл зберігати деформовану форму після зняття навантаження та теорія повзучості про зміни під дією навантаження з часом;
- конструктивна нелінійність – зміна розрахункової схеми споруди в процесі її навантаження, пов'язана із взаємними зсувами (наприклад, розкриттям швів і тріщин, прослизанням) окремих частин споруди та основи.

Ротор і спиці є ізотропними. Залежність зміни модуля пружності від температури представлена в таблиці 2.

Матеріал обода ротора є ортотропним, проте з огляду на можливість вибору напрямку дії сил використовується вибір тензора за потрібним напрямком (табл. 2).

Таблиця 2
Залежність модуля пружності сталі від температури

Температура, °С	Модуль пружності сталі, · 10 ¹¹ МПа		
	Вуглецеві та низьколеговані сталі	Тепло- та корозійно-стійкі хромисті сталі	Жароміцні та жаростійкі сталі
20	1,99	2,15	2,00
100	1,91	2,15	2,00
150	1,86	2,05	1,99
200	1,81	1,98	1,97
250	1,76	1,95	1,94
300	1,71	1,9	1,90
350	1,64	1,78	1,85
400	1,55	1,71	1,80
450	1,40	1,63	1,74

Окрім металевих елементів конструкції, в роторі є полюса, що містять ізоляцію та елементи з пластику (рис. 8).

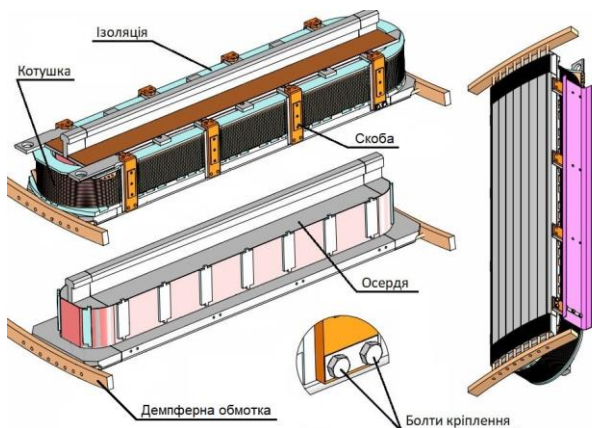


Рис. 8. Конструкція полюса

Розглянемо детальніше полюс: котушка полюса складається з різних компонентів, таких як провідні стрижні, ізоляція та прокладки (рис. 9). При цьому вони попередньо запресовуються зусиллям, еквівалентним централізованим силам, але зі зворотним знаком. Залежність зміни модуля пружності від температури для неметалевих елементів представлена на рис. 10.



Рис. 9. Котушка полюса

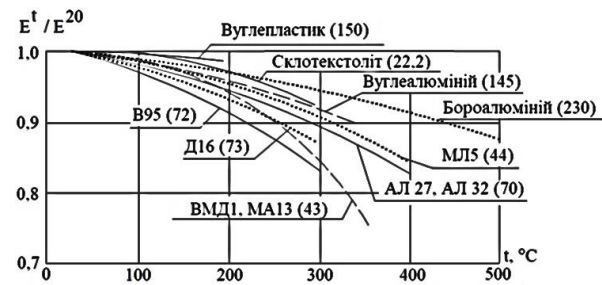


Рис. 10. Залежність модуля пружності від температури для пластику

Механічний розрахунок ротора гідрогенератора

Як зазначено вище, для проведення тензометричних випробувань є необхідність виконання механічного розрахунку зусиль.

Коефіцієнт χ передачі зусилля від основного навантаження запресованого полюса визначається за формулою (1) та показує, яка частина робочого зусилля F_x передається на один умовний елемент кріплення.

$$\chi = \lambda_0 / (\lambda_1 + \lambda_0), \quad (1)$$

де λ_0, λ_1 – піддатливість елементів системи полюса та струмопровідних елементів.

Піддатливість кожної з систем визначається як сумарне переміщення всіх елементів системи від одиничного осьового навантаження.

В конструкції полюса в загальному випадку, що навантажена зусиллям F_x (від дії відцентрових сил) та моментами M_x та M_y (моменти викликані зміщенням компонентів відносно нормалі до осі обертання ротору) на кожний, i -й компонент полюсу припадає зусилля, що обчислюється за формулою

$$F_{\chi_i} = \frac{1}{\lambda_{\chi_i}} \left(\frac{F_X}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{\chi_i}}} - \frac{M_{xy_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{\lambda_{\chi_i}}} + \frac{M_{yx_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\lambda_{\chi_i}}} \right), \quad (2)$$

де M_x , M_y – момент, що передається у напрямку осі OX та OY відповідно; n – кількість компонентів полюса; λ_{χ_i} – осьова піддатливість i -го елемента полюса при запресуванні поєднаного полюса.

Тоді зусилля в кожному i -му елементу полюса від навантаження при дії відцентрових сил на угонній частоті обертання становить

$$F_{B_i} = \chi_i \cdot F_{\chi_i}, \quad (3)$$

де χ_i – коефіцієнт основного навантаження з номером i для послідовності елементів при збірці полюса.

Для уточнення значень механічних напружень в ободі ротора був проведений тривимірний міцнісний розрахунок обода ротора у програмному комплексі SolidWorks. У тривимірному розрахунку задається сумарне навантаження, що діє на полюси в частині з'єднання з ободом. Значуща величина зусилля задається відповідно формулам (1) – (3).

Розрахункова ґратка будується для кожного окремого елемента конструкції. Вводиться елемент керування ґраткою. При цьому за мінімальним геометричним елементом має бути не менше 3-х елементів ґратки. Збіжність результатів проводилася шляхом зменшення ґратки таким чином, щоб результати не відрізнялися більш ніж на 0,5%. Основні методи моделювання термонапруженого стану елементів детально описано у роботі [9]. Основна задача розрахунку – визначення деформації зовнішнього діаметра обода ротора при угонній частоті обертання. Результати розрахунку наведено на рис. 11 – 16.

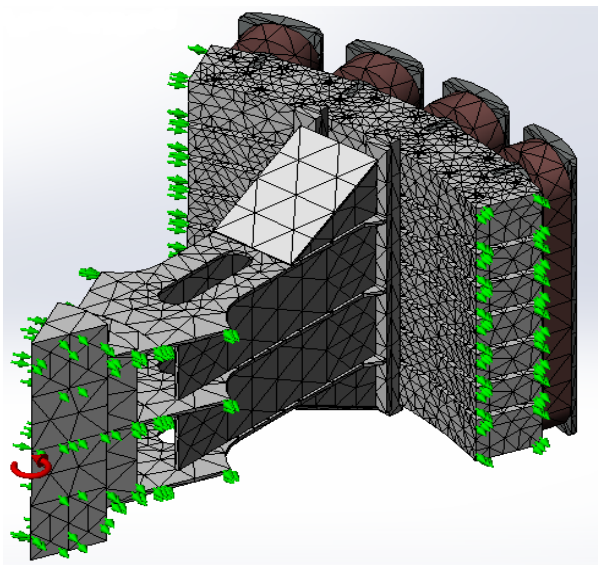


Рис. 11. Розрахункова ґратка

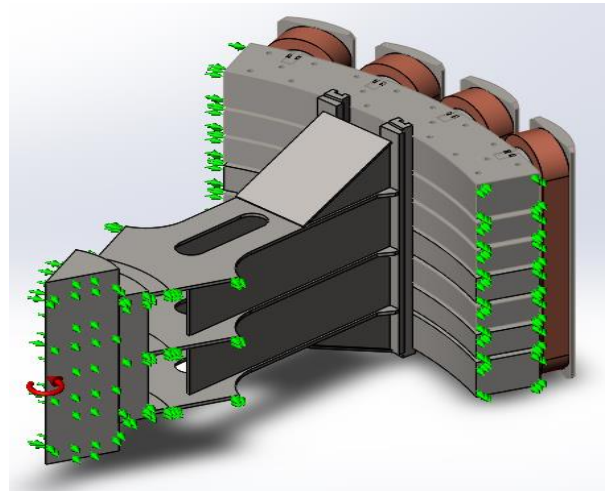


Рис. 12. Граничні умови розрахунку

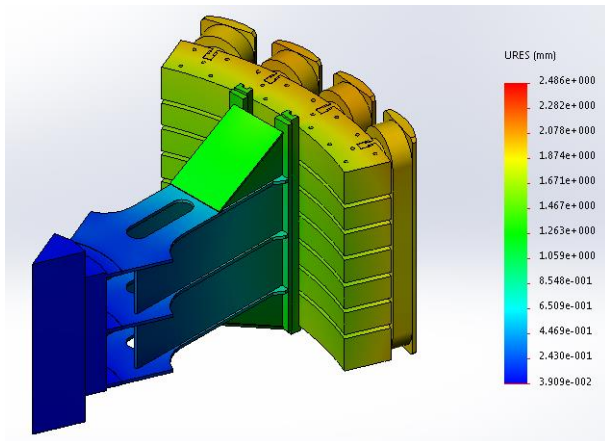


Рис. 13. Епіюра переміщень під час нагрівання обода ротора на 60°C (розрахункова температура 358 K , температура нульової деформації 298 K)

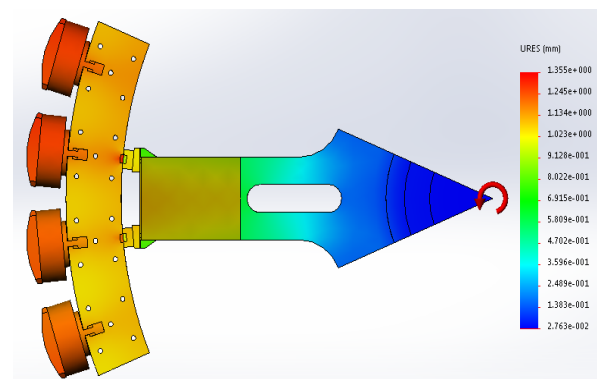


Рис. 14. Деформація обода ротора при угонній частоті обертання

В результаті проведеного тривимірного розрахунку деформація обода ротора при угонній частоті обертання становить 1,3 мм на радіус (2,3 м на діа-

метр), що є задовільним. При задані необхідного перевищення температури для гарячого розклинування обода ротора 60 °С, збільшення натягу становить 3,3...3,4 мм.

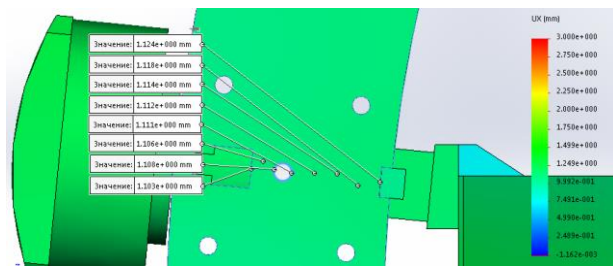


Рис. 15. Епюра переміщень в ободі ротора при угонній частоті обертання без попереднього натягу в клинах (максимальне переміщення 1,1 мм)

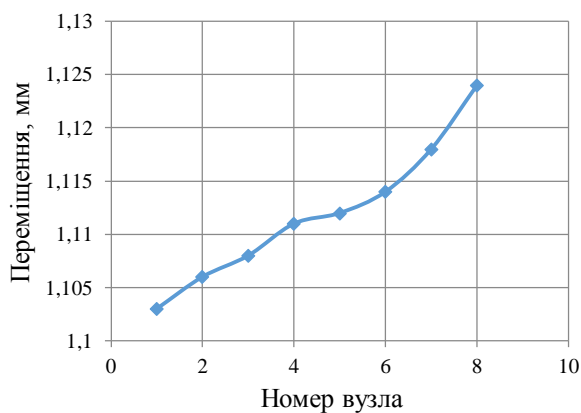


Рис. 16. Графік переміщень при угонній частоті обертання в ободі ротора без попереднього натягу в клинах

Висновки

У поданій статті вперше детально розглянуто технологію відновлення форми роторів гідрогенераторів, що поєднує в собі елементи аналітичних та тривимірних механічних розрахунків. Вперше в тривимірній постановці виконано чисельні розрахунки переміщень при переклинуванні обода ротора при угонній частоті обертання з врахуванням всіх модулів пружності елементів конструкції.

Представлена технологія процесу відновлення ротора відповідає вимогам Європейських стандартів.

Література

1. Ландау, Ю. А. Анализ состояния и перспективы использования гидроэнергетических ресурсов при развитии объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины [Текст] / Ю. А. Ландау // Гідроенергетика України. Серія: Наука. Науково-технічному прогресу в гідроенергетиці. – 2020. – ISSN 1812-9277. – С. 16–21.

2. Энергетика: история, современность и будущее. Кн. 3: Развитие теплоэнергетики та гідроенергетики [Текст] / Є. Т. Базеєв, Б. Д. Білека, Є. П. Васильєв, Г. Б. Варламов, І. А. Вольчин ; Наук. ред. В. М. Клименко, Ю. О. Ландау, І. Я. Сігал. – Київ, 2013. – 399 с. – ISBN 978-966-8163-15-9.

3. Алексеев, Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов [Текст] / Б. А. Алексеев. – М. : Научно-учебный центр ЭНАС, 1998. – 144 с.

4. Кузьмин, В. В. Режимы эксплуатации и наиболее часто встречающиеся повреждения гидрогенераторов ГЭС Днепровского каскада. Влияние параметров воздушного зазора между ротором и статором гидрогенератора на надежность его работы [Текст] / В. В. Кузьмин, А. Н. Вакуленко // Гідроенергетика України. – 2005. – №2. – С. 22-30.

5. Analysis of the gyroscopic effect on the hydro-turbine generator unit [Text] / J. Li, D. Chen, G. Liu, X. Gao, K. Miao, Y. Li, B. Xu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 132. – P. 138-152. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.06.020.

6. Analysis of magnetic forces and vibration in a converter-fed synchronous hydrogenator [Text] / M. Valavi, A. Nysveen, R. Nilsen, B. J. Le, E. Devillers // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Cincinnati, OH, USA, 2017. – P. 1838-1844. DOI: 0.1109/ECCE.2017.8096018.

7. ДСТУ EN IEC 60034-33:2022 Машини електричні обертові. Частина 33. Синхронні гідрогенератори, включаючи моторгенератори. Особливі вимоги (EN IEC 60034-33:2022, IDT; IEC 60034-33:2022, IDT) [Текст] / ДП «Український науково-дослідний та навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). – чинний з 2022-28-12. – Київ, 2022. – Мова видання: англ. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=102789. – 22.03.2023.

8. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов [Текст] : в 2-х т. : пер. с англ. / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1965. – Том 1. Элементарная теория и задачи. – 364 с.

9. The Methods of Three-Dimensional Modeling of the Hydrogenerator Thrust Bearing [Text] / O. Tretiak, D. Kritskiy, I. Kobzar, M. Arefieva, V. Nazarenko // Computation. – 2022. – Vol. 10, iss. 9. – Article no. 152. DOI: 10.3390/computation10090152.

References

1. Landau, Yu. A. Analyz sostojanyja y perspektivy uspolzovanyja hydroenerhetyčeskyx resursov pry razvytyu obiedynennoj enerhosystemy (OES) Ukrainy [Analysis of the state and prospects for the use of hydropower resources in the development of

the unified energy system (UES) of Ukraine]. *Hydropower of Ukraine. Series: Science. Scientific and technical progress in hydropower.* 2020, ISSN 1812-9277, pp. 16–21.

2. Bazeev, E. T., Bileka, B. D., Vasiliev, E. P., Varlamov, G. B. & Volchyn, I. A. *Energetyka: istoriya, suchasnist i majbutnye. Kn. 3: Rozvytok teploenergetyky ta gidroenergetyky* [Energy: history, modernity and future. Book 3: Development of heat and hydropower]. Kyiv, 2013. 399 p. ISBN 978-966-8163-15-9.

3. Alekseev, B. A. *Opredeleniye sostoyaniya (diagnostika) krupnykh gidrogeneratorov* [Determination of the state (diagnostics) of large hydro generators]. Moscow, Scientific and educational center ENAS, 1998. 144 p.

4. Kuzmin, V. V. & Vakulenko A. N. *Rezhimy ekspluatatsii i naiboleye chasto vstrechayushchiesya povrezhdeniya gidrogeneratorov GES Dneprovskogo kaskada. Vliyaniye parametrov vozdushnogo zozora mezhd rotorom i statorom gidrogeneratora na nadezhnost' yego raboty* [Operating modes and the most common damage to hydroelectric generators of the Dnieper cascade HPP. Influence of the air gap parameters between the rotor and the stator of the hydroelectric generator on the reliability of its operation]. *Hydropower of Ukraine*, 2005, no. 2, pp. 22-30.

5. Li, J., Chen, D., Liu, G., Gao, X., Miao, K., Li, Y. & Xu, B. Analysis of the gyroscopic effect on the hydro-turbine generator unit. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 132, pp. 138-152. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.06.020.

6. Valavi, M., Nysveen, A., Nilsen, R., Le, B. J. & Devillers E. Analysis of magnetic forces and vibration in a converter-fed synchronous hydrogenator. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 1838-1844. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096018.

7. *DSTU EN IEC 60034-33:2022 Electric rotating machines. Part 33. Synchronous hydrogen generators, including motor generators. Special requirements.* International Standart (2022). Available at: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=102789 (accessed 22/03/2023).

8. Timoshenko, S. P. *Soprotivleniye materialov* [Resistance of materials. In 2 volumes]. Moscow, Nauka Publ., 1965. Vol. 1. Elementary theory and problems. 364 p.

9. Tretiak, O., Kritskiy, D., Kobzar, I., Arefieva, M. & Nazarenko, V. The Methods of Three-Dimensional Modeling of the Hydrogenerator Thrust Bearing. *Computation*, 2022, vol. 10, iss. 9, article no. 152. DOI: 10.3390/computation10090152.

Надійшла до редакції 03.05.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

THE TECHNOLOGY OF RESTORATION HYDROGENERATOR ROTOR SHAPE

Pavlo Makarov

The **object** of research in this article is the change in the rotor shape during the operation of hydraulic units. The **subject of study** in this article is the design and geometric state of the shape of a rotor with irregular geometry of hydraulic generators-engines. This study produced a three-dimensional mechanical calculation of the rotor segment for further use during strain gauge tests. **Tasks:** investigate the peculiarities of the rotor shape restoration technology; to describe the basic assumptions for the three-dimensional mechanical calculation of rotor deformations at the over-speed; and perform a three-dimensional calculation of rotor movements considering the main forces falling on the pole connection, which are obtained using classical methods. The **methods** used are: finite element method of mathematical modeling of the thermal stress state of nodes. The following **results** were obtained: a detailed description of the technological process of restoring the shape of the rotor using the hot wedging method is given. Three-dimensional models of the rotor segment were developed, and a three-dimensional mechanical calculation of this model was performed, as a result of which satisfactory values of the displacement of the rotor of the hydraulic generator at the overspeed were obtained, considering the recovery technology. To reconstruct the rotor rim, it is necessary to heat the rotor rim to a temperature difference between the rim and the frame of at least 60 °C. Next, the hot wedging of the rotor rim is performed with the driving of each of the driving wedges by the same amount, which ensures the creation of the necessary diametrical tension between the rim and the frame of the rotor and avoids the displacement of the rotor rim relative to the frame. The control of this process is performed using strain gauges. If necessary, it is necessary to cool the rotor rim until the temperatures of the rim and the frame of the rotor are equal. **Conclusions.** The scientific novelty consists of a combined approach to the evaluation of the deformation of the rotor rim after restoring its shape, which includes elements of analytical mechanical calculation and calculation in a three-dimensional setting. The presented technology for the rotor restoration process meets European requirements.

Keywords: hydrogenerator; rotor; air gap; wedging of poles; strength calculation.

Макаров Павло Миколайович – асп. каф. «Аерогідродинаміки», Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Pavlo Makarov – PhD student of the «Aerohydrodynamics» Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: p.makarov_khai@gmx.com, ORCID: 0009-0008-6415-8970.