

О. П. Грубой*, А. К. Шофул*, О. О. Ключников, Г. М. Федоренко, О. Г. Кенсицький

* Державне підприємство «Завод «Електроважмаш», Харків
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль

МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТОРА Й РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГУНА ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

Розроблено математичну модель теплового стану гідрогенератора-двигуна Дністровської ГАЕС. Проведено розрахунки нагріву основних елементів статора ротора в різних режимах навантаження машини. Отримані результати співставлено з даними теплових випробувань гідрогенератора-двигуна. Запропоновано шляхи підвищення надійності та навантажувальної здатності агрегату.

Ключові слова: гідрогенератор-двигун, моделювання, тепловий стан, надійність.

Сьогодні гідроенергетика (у першу чергу ГАЕС) – гарант технологічної безпеки експлуатації АЕС. Як правило, ефективними, надійними та безпечними є енергетичні єдині технологічні комплекси АЕС + ГЕС + ГАЕС [1]. Розміщення ГЕС і ГАЕС поблизу АЕС, завдяки їхній швидкодії, дає змогу використовувати їх і як додатковий резерв електрозабезпечення власних потреб АЕС у позаштатних та аварійних ситуаціях. Подальший розширений розвиток ядерної енергетики, передбачений Об'єднаною енергетичною стратегією (ОЕС) України на період до 2030 р. [2], неможливий без випереджаючого зростання в ОЕС маневрених потужностей, частка яких у загальному балансі електроенергетики має бути не меншою 15 %.

Метою створення математичної моделі теплового стану гідрогенератора-двигуна типу СВО 1255/255-40 УХЛ4 було визначення нагріву основних активних елементів і вузлів машини та перевірка технічних рішень, спрямованих на підвищення її надійності та навантажувальної здатності.

Математична модель описує процеси масопереносу та теплообміну в елементах і вузлах статора та ротора гідрогенератора-двигуна й дозволяє визначити не тільки середні по об'єму, а й максимальні температури, а також локалізувати їх розташування в машині. При цьому враховуються реальні схема та умови охолодження активних зон, підігрів охолоджуючого повітря при проходженні тракту охолодження (рис. 1).

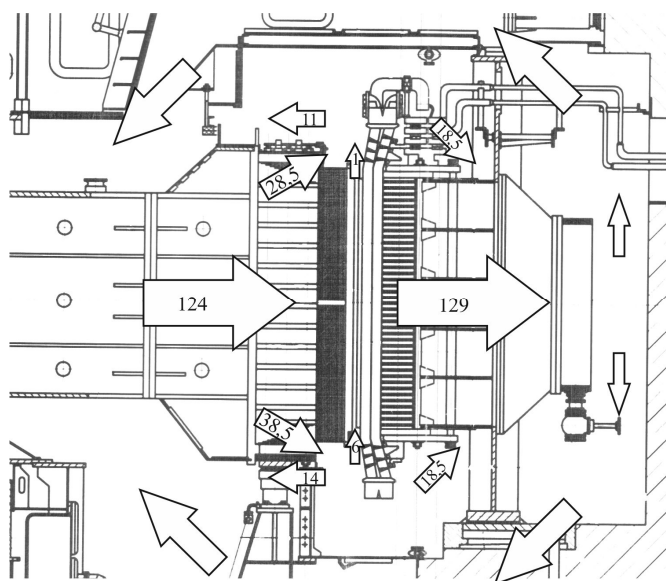


Рис. 1. Схема вентиляції гідрогенератора-двигуна СВО 1255/255-40 УХЛ4 Дністровської ГАЕС (цифра всередині стрілки – розрахункова витрата повітря через відповідні канали).

© О. П. Грубой, А. К. Шофул, О. О. Ключников,
Г. М. Федоренко, О. Г. Кенсицький, 2012

Із урахуванням конструктивних особливостей гідрогенератора-двигуна та схеми циркуляції повітря розглядалась польова задача спільного розрахунку тривимірного температурного поля для сектора осердя та обмотки статора й ротора.

При математичному описанні температурного поля було прийнято припущення, що спрощують розрахунки, але істотно не впливають на їхню адекватність:

1. З огляду на наявність транспозиції в пазовій і лобовій частинах стрижня обмотки статора приймаємо, що тепловиділення в міді по висоті стрижня розподілено рівномірно.

2. Вважаємо, що тепловиділення в міді обмотки полюсів ротора також розподілено рівномірно.

3. Приймаємо, що тепловиділення по довжині стрижня обмотки статора та витків обмотки полюсів ротора розподілено рівномірно.

4. Вважаємо, що теплові втрати в сталі осердя статора в осьовому напрямку також розподілено рівномірно.

5. Елементи розрахункової області розглядаються як однорідні анізотропні тіла з усередненими теплофізичними характеристиками матеріалів за відповідним напрямком у межах елементарних розрахункових об'ємів.

6. Коефіцієнти тепловіддачі з охолоджуючих поверхонь визначаються за відповідними критеріальними залежностями та експериментальними даними [6, 42, 51].

7. Залежність теплофізичних параметрів (коефіцієнтів теплопровідності, питомої щільності, теплоємності) матеріалів обмотки та осердя статора від температури не враховується.

8. При виборі розрахункової області передбачається, що існує симетрія та періодична повторювальність елементів конструкції обмотки й осердя, умов охолодження та тепловиділень по колу статора й ротора.

9. Електромагнітні втрати в обмотках статора та ротора задаються для очікуваної розрахункової температури, а потім перераховуються відповідно до отриманих рівнів нагріву.

Розрахункова схема охоплює половину зубцевого (пазового) ділення статора та половину полюсного ділення ротора. Розрахункові схеми для статора й ротора наведено на рис. 2.

Верхній і нижній стрижні обмотки статора в поперечному перерізі розбито навпіл, що пов'язано із значною висотою стрижня порівняно з його шириною (співвідношення приблизно 5 : 1). Аналогічно навпіл розбита по висоті обмотка полюса ротора. Для пазової частини обмотки статора та котушки полюса ротора математично коректно описано їхній тепловий зв'язок з осердям (сталлю) статора й полюса ротора, температура яких у вигляді тривимірного поля. Аналогічно описано тепловий зв'язок лобових частин обмотки статора з охолоджуючим повітрям і пазовою частиною обмотки.

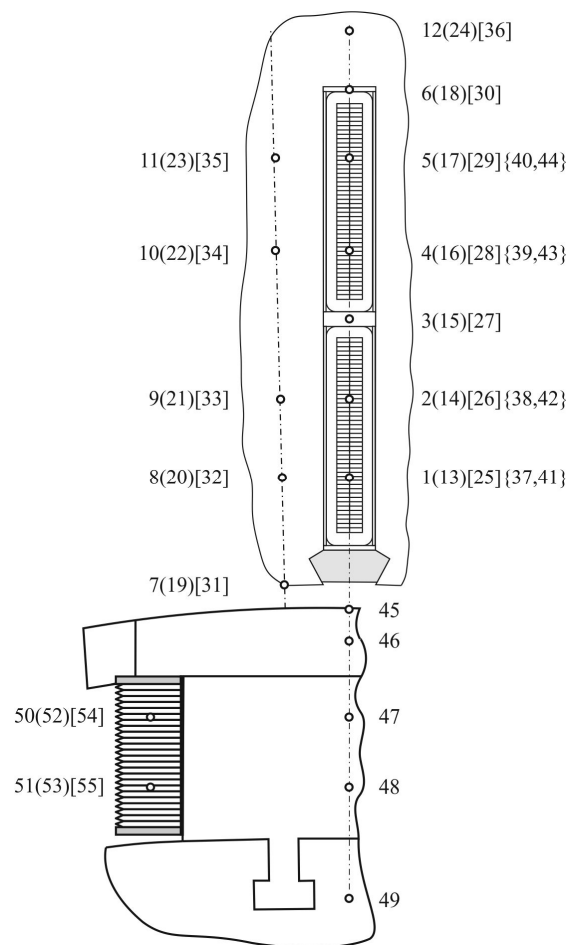


Рис. 2. Розрахункова схема статора й ротора гідрогенератора-двигуна.

Уздовж машини розрахунок виконано для п'яти перетинів статора (рис. 3):
 верхня лобова частина обмотки статора;
 верхня кінцева зона осердя статора (вісім верхніх кінцевих пакетів);
 середня частина осердя статора (40 центральних пакетів);
 нижня кінцева зона осердя статора (вісім нижніх кінцевих пакетів);
 нижня лобова частина обмотки статора.

Позначення «нижній» та «верхній» відповідають реальному розташуванню елементів і вузлів вертикального гідрогенератора-двигуна енергоблока Дністровської ГАЕС.

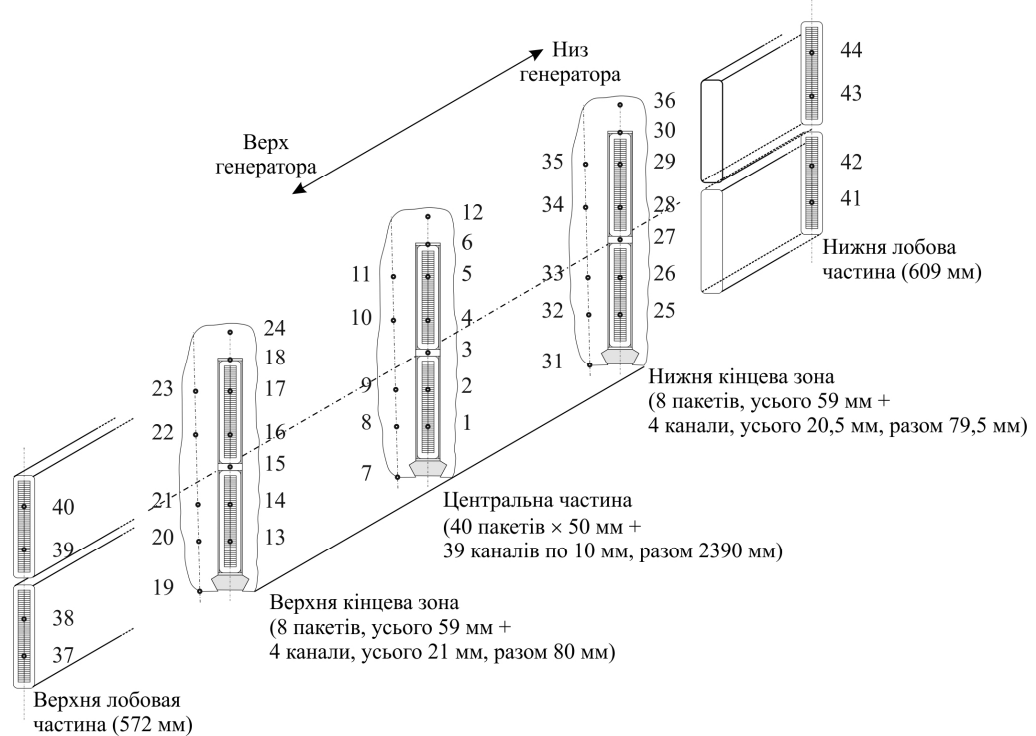


Рис. 3. Розрахункова схема статора гідрогенератора-двигуна.

Позначення вузлів розрахункової схеми на рис. 2 без дужок відповідають центральній частині статора, у круглих дужках – верхній кінцевій зоні статора, у квадратних дужках – нижній кінцевій зоні статора, у фігурних дужках – верхній і нижній лобовим частинам обмотки статора.

Аналогічно розрахунок ротора виконано для трьох перерізів:

центральної частини, що включає осердя полюса та центральну частину обмотки збудження;

верхньої лобової частини обмотки збудження та нижньої лобової частини обмотки збудження.

Відповідно до наявної схеми циркуляції холодоагенту (повітря) розроблено розрахункову схему (рис. 4).

Охолоджене повітря після газоохолоджувачів подається до центральної зони хрестовини (вузол 64), звідки через канали обода ротора (вузол 56) та між полюсні вікна (вузол 57) потрапляє у повітряний зазор між статором і ротором (вузол 58). Частина охолодженого повітря із зони хрестовини за допомогою верхнього і нижнього вентиляторів спрямовується у зону верхніх та нижніх лобових частин обмотки статора (вузли 62 і 63 відповідно).

Із повітряного зазору повітря проходить через канали осердя статора (вузол 59 для зубцевої зони й 60 для зони ярма) і попадає в зону над спинкою ярма (вузол 61). Сюди ж через натискні гребінки також подається повітря із зон верхніх і нижніх лобових частин обмотки статора. Увесь обсяг холодоагенту із зони над спинкою ярма статора спрямовується до газоохолоджувачів.

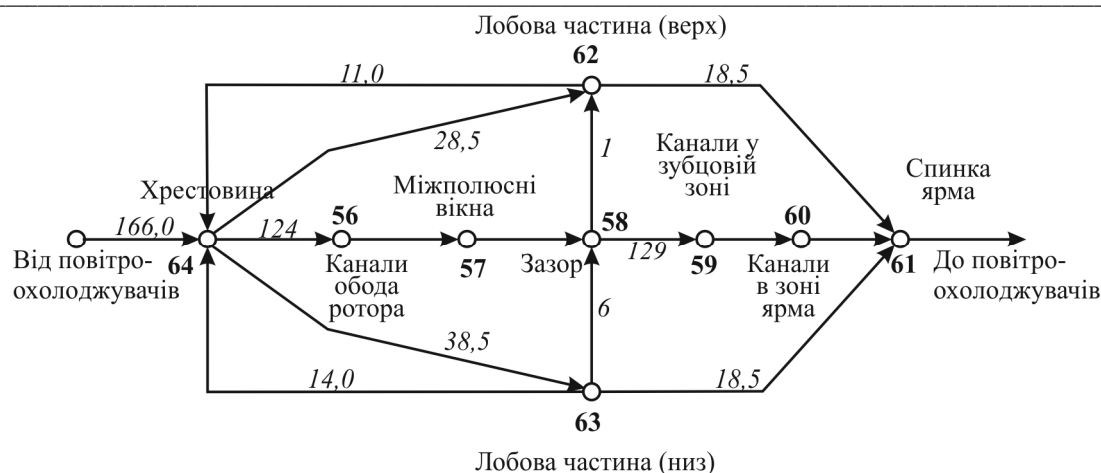


Рис. 4. Розрахункова схема циркуляції холодоагенту (повітря) у гідрогенераторі-двигуні.

Частина повітря із зони лобових частин обмотки статора через повітророзподільні ущільнення повертається до центральної частини хрестовини. Враховується перетікання повітря із зони нижніх лобових частин обмотки статора в повітряний зазор між статором і ротором і далі з повітряного зазору в зону верхніх лобових частин. Обсяги циркуляції повітря (розрахункові) позначено на рис. 4 курсивом.

У табл. 1 наведено отримані від заводу-виробника розрахункові значення теплових втрат гідрогенератора-двигуна для номінальних генераторного та двигунного режимів навантаження.

Як видно, найбільш напруженим із точки зору максимальних теплових втрат для гідрогенератора-двигуна є двигунний режим. І саме для нього в подальшому будуть наведені всі розрахунки. Максимальні температури основних вузлів генератора-двигуна в генераторному режимі можуть бути отримані шляхом перерахунку втрат, що залежать від режиму навантаження (втрати в обмотках статора й ротора).

Таблиця 1. Втрати гідрогенератора-двигуна типу СВ 1255/255-40 УХЛ4 в номінальних режимах навантаження

Найменування втрат	Режим навантаження	
	Генератор	Двигун
Втрати холостого ходу, кВт	1125,3	1125,3
Втрати короткого замикання, кВт	1023,3	1419,6
Втрати на збудження, кВт	657,2	610,7
Втрати на вентиляцію, кВт	1588	1588
Механічні втрати, кВт	432	432
Сума втрат, кВт	4825,8	5157,6
Розрахунковий ККД, %	98,532	98,771

Теплові втрати були розподілені по конструктивних вузлах машини відповідно до відомих співвідношень [3].

Теплофізичні параметри матеріалів і холодоагентів, що застосовувалися при проведенні розрахунків, зведено в табл. 2.

Орієнтовно інтенсивність теплообміну (коефіцієнт тепловіддачі) для основних теплообмінних поверхонь визначалась, виходячи з даних теоретичних та експериментальних досліджень потужних турбо- та гідрогенераторів [3 - 7].

Вихідними даними для визначення інтенсивності теплообміну були розрахункові значення витрати холодоагенту по основних зонах, отримані з вентиляційного розрахунку (див. рис. 1).

Розрахунок нагріву основних активних елементів машини було виконано відповідно до прийнятих припущень та викладених вище розрахунків втрат в окремих вузлах, парамет-

рів теплопередачі конструктивних матеріалів і теплообміну основних теплообмінних поверхонь.

У табл. 3 наведено максимальні температури основних активних елементів у двигунному режимі при номінальному навантаженні. Максимум температур спостерігається у верхніх стрижнях обмотки статора в центральній частині осердя статора – 108,6 °С. Температура лобових частин обмотки статора при цьому досягає у верхній частині статора 80,0 °С, у нижній – 77,9 °С. Обмотка полюса ротора має максимум у 85,6 °С, сталь осердя статора – 89,4 °С, сталь башмака полюса ротора – 78,7 °С.

Таблиця 2. Теплофізичні параметри конструкційних матеріалів і холодоагентів

Параметр	Значення
Коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К):	
- ізоляція елементарних провідників стрижня обмотки статора	0,20
- корпусна ізоляція обмотки статора	0,20
- сталь пакетів осердя статора вздовж листів	36,0
- сталь пакетів осердя статора поперек листів	3,2
- мідь провідників обмоток статора й ротора	390,0
- сталь полюсів й обода ротора вздовж листів	60,0
- сталь полюсів й обода ротора поперек листів	2,0
- ізоляція котушки полюса ротора	0,16
Холодоагент (повітря) при розрахунковій температурі 60 °С:	
- коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,0285
- густина, кг/м ³	1,060
- питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1020

Таблиця 3. Максимальні температури активних елементів гідрогенератора-двигуна у двигунному режимі при номінальному навантаженні (температура повітря після газоохолоджувачів – 35 °С)

Найменування вузла	Максимальна температура, °С
Верхні стрижні обмотки статора	108,6
Нижні стрижні обмотки статора	104,3
Верхні лобові частини обмотки статора	80,0
Нижні лобові частини обмотки статора	77,9
Зубці осердя статора	89,4
Ярмо осердя статора	77,7
Обмотка полюсів ротора	85,6
Полюсний башмак ротора	78,7
Сталь полюсу ротора	72,1
Сталь ободу ротора	48,8
Гаряче повітря на вході газоохолоджувача	63,2

Максимум температури охолоджуючого повітря спостерігається в радіальних вентиляційних каналах осердя статора в зоні ярма й сягає 65,8 °С. До газоохолоджувачів після змішування з повітрям із зони лобових частин холодоагент потрапляє з температурою 63,2 °С.

На рис. 5 наведено розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні у двигунному режимі.

Аналогічно проведено розрахунки нагріву основних активних елементів машини для генераторного режиму при номінальному навантаженні.

Основні втрати в сталі осердя статора, режими охолодження теплообмінних поверхонь, механічні втрати та втрати на вентиляцію для генераторного режиму приймалися такими ж, як і для двигунного режиму, що обумовлюється однаковим рівнем напруги на затискачах обмотки статора, а також швидкості обертання ротора.

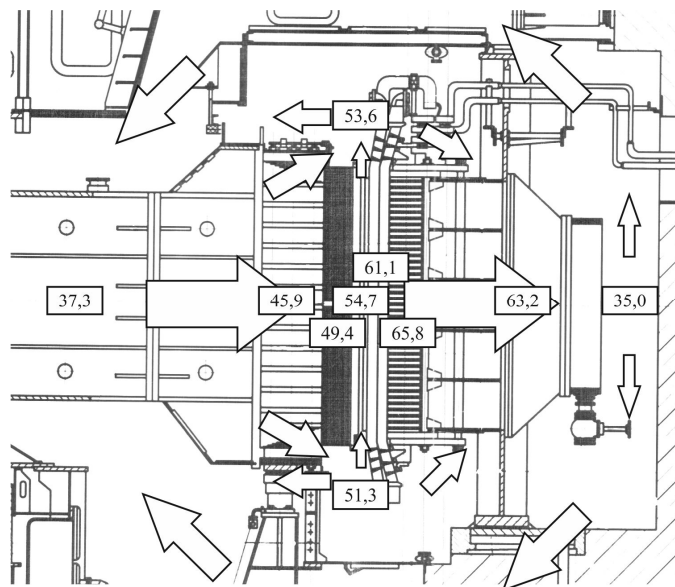


Рис. 5. Розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні у двигунному режимі (температура повітря після газоохолоджувачів 35 °С).

Перераховувалися втрати в обмотках статора й полюса ротора, а також додаткові втрати на поверхні полюсів ротора відповідно до реальних значень струмів.

У табл. 4 наведено максимальні температури основних активних елементів у генераторному режимі при номінальному навантаженні. Максимум температур, як і в генераторному режимі, спостерігається у верхніх стрижнях обмотки статора в центральній частині осердя – 95,3 °С. Температура лобових частин обмотки статора при цьому досягає у верхній частині статора 70,3 °С, у нижній – 68,6 °С. Обмотка полюса ротора має максимум температури 87,9 °С, температура сталі осердя статора 82,6 °С, а сталі башмака полюса ротора – 75,0 °С.

Максимум температури охолоджуючого повітря спостерігається в радіальних вентиляційних каналах осердя статора в зоні ярма й сягає 63,5 °С. До газоохолоджувачів після змішування з повітрям із зони лобових частин холодоагент потрапляє з температурою 61,0 °С.

Таблиця 4. Максимальні температури активних елементів гідрогенератора-двигуна у генераторному режимі при номінальному навантаженні (температура повітря після газоохолоджувачів 35 °С)

Найменування вузла	Максимальна температура, °С
Верхні стрижні обмотки статора	95,3
Нижні стрижні обмотки статора	92,6
Верхні лобові частини обмотки статора	70,3
Нижні лобові частини обмотки статора	68,6
Зубці осердя статора	82,6
Ярмо осердя статора	74,8
Обмотка полюсів ротора	87,9
Полюсний башмак ротора	75,0
Сталь полюса ротора	69,7
Сталь обода ротора	48,3
Гаряче повітря на вході газоохолоджувача	61,0

На рис. 6 наведено розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні в генераторному режимі.

Таким чином, можна відзначити при номінальному навантаженні і в генераторному, і у двигунному режимах максимальні температури активних елементів статора й ротора не перевищують граничних значень, обумовлених керівництвом з експлуатації: для обмотки й сталі осердя статора 120 °С; для обмотки ротора 130 °С.

Адекватність розробленої моделі розрахунку нагрівів основних активних елементів статора й ротора гідрогенератора-двигуна типу СВО 1255/255-40 УХЛ4 Дністровської ГАЕС було перевірено шляхом порівняння розрахункових значень температури активних зон з експериментальними даними [8], отриманими під час проведення теплових випробувань в умовах станції під час дослідно-промислової експлуатації головного зразка машини, для одного режиму навантаження.

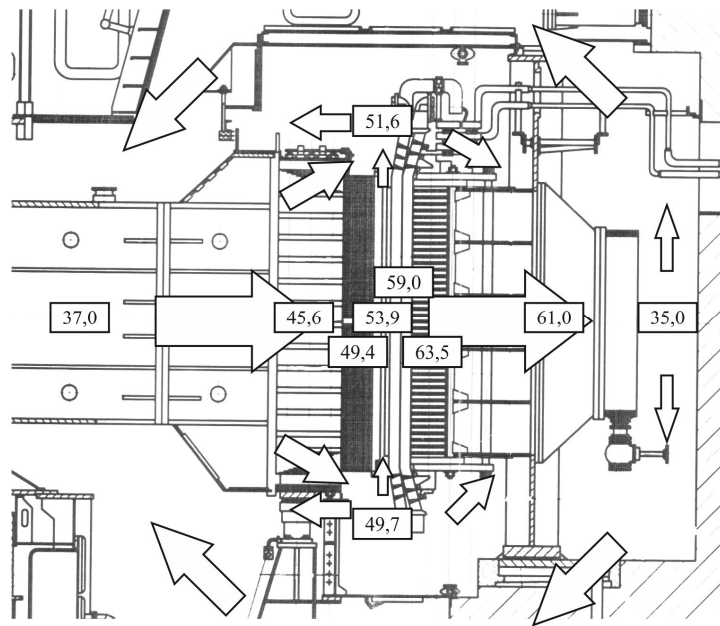


Рис. 6. Розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні в генераторному режимі (температура повітря після газоохолоджувачів 35 °С)

При проведенні експериментальних досліджень реальні значення температур фіксувалися за допомогою штатних засобів термоконтролю (термометрів опору) для низки характерних режимів навантаження. Так, для порівняння було вибрано рівень навантаження у 400 МВт ($\cos \varphi = 1,0$) у двигунному режимі, що становить майже 95 % від номінального при дещо завищеному коефіцієнті потужності (номінальний $\cos \varphi = 0,979$).

Для проведення розрахунку нагрівів на математичній моделі відповідно до реального режиму було перераховано втрати обмотках статора й ротора гідрогенератора-двигуна та задано середню температуру холодного повітря після газоохолоджувачів (25 °С).

Отримані розрахункові та експериментальні значення нагрівів окремих зон машини зведено в табл. 5.

Із наведених результатів можна зробити висновок, що розроблена математична модель у цілому адекватно відображає реальний теплообмін у корпусі турбогенератора-двигуна. Різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями температур окремих елементів не перевищує 10 %, що для теплових розрахунків є цілком прийнятним.

Розбіжності, не стільки у рівнях температур, скільки у характері їхнього розподілу, пов'язані перш за все з достовірністю вихідних даних – розподілом тепловиділень по активних елементах машини, реальною циркуляцією холодоагенту, урахуванням витоків тепла через конструктивні елементи енергоблока тощо.

Таблиця 5. Розрахункові (1) та експериментальні (2) [8] нагріви основних елементів гідрогенератора-двигуна для навантаження 400 МВт ($\cos \varphi = 1,0$) у двигунному режимі

№	Обмотка статора			Сталь осердя статора			Обмотка ротора	Гаряче повітря
	бік турбіни	центральна частина	бік виводів	бік турбіни	центральна частина	бік виводів		
1	70,4	90,3*	71,3	57,5	66,6	57,8	72,3	51,7
2	67,4	65,2	73,6	62,1	61,8	66,9	72,0	47,2

* Максимальна температура міді верхнього стрижня обмотки статора.

Так, наприклад, із експериментальних даних можна зробити висновок, що рівні взаємного перетоку повітря між нижніми лобовими частинами, повітряним зазором і верхніми лобовими частинами більший, ніж було визначено вентиляційним розрахунком.

У будь-якому випадку використання розробленої моделі дає змогу оцінити нагрів активних елементів статора й ротора в різних режимах навантаження, визначити ефективність застосування нових технічних рішень і конструктивних матеріалів. Особливо зазначене стосується ротора, температура якого в реальних умовах вимірюється опосередковано й по суті є середньою. У той же час необхідно знати максимальні температури та місце їхнього розташування в машині.

Основним фактором, що обмежує навантаження потужної електричної машини, зокрема гідрогенератора-двигуна, є максимальна температура активних елементів статора й ротора. Особливо це стосується обмотки статора, оскільки саме її ізоляція повинна бути розрахована на номінальну напругу на затискачах генератора. Підвищений нагрів останньої в робочих режимах призводить до її передчасного старіння й пошкодження зі всіма негативними наслідками.

При опосередкованому охолодженні обмотки статора, що ми маємо в нашому випадку, усі теплові втрати в міді обмотки відводяться до холодоагенту (повітря) через головну корпусну ізоляцію. Увесь обсяг головної ізоляції обмотки статора є тепловим бар'єром, що погіршує ефективність системи охолодження й обмежує робочу потужність машини, погіршує її ККД. Особливо наведене стає актуальним, якщо порівняти теплопровідність слюдяної ізоляції ($\lambda = 0,16 - 0,25$ Вт/(м·К)), що застосовується для таких рівнів напруги (15,75 кВ), із теплопровідністю інших конструктивних матеріалів – міді й сталі осердя статора (390 та 36 - 40 відповідно).

Підвищення інтегральної теплопровідності головної корпусної ізоляції може бути досягнуте двома шляхами: зменшенням товщини ізоляції; підвищенням її питомої теплопровідності.

Перший шлях передбачає наявність нових матеріалів із підвищеною діелектричною міцністю й у сучасних умовах неможливий, другий – застосування ізоляції з підвищеною теплопровідністю – є більш доцільним і для нього існують необхідні умови.

Опубліковано низку досліджень [9 - 12] щодо розробки систем високотеплопровідної (НТС) ізоляції із застосуванням вакуум-нагнітального просочення (VIP), основною відмінністю якої є застосування високотеплопровідних наповнювачів. При цьому до наповнювачів ставилися вимоги:

- висока теплопровідність та опір до часткових розрядів;
- сумісність із зв'язуючим і просочувальним компаундом;
- хімічна стабільність і низька токсичність;
- висока якість виробництва й прийнятна вартість.

У результаті досліджень було визначено, що тільки нітрид бору BN (*hexagonal*) та окис алюмінію Al_2O_3 відповідають наведеним вимогам і можуть застосовуватися у складі високовольної ізоляції. При цьому діелектричні та механічні властивості ізоляції не змінюються. Більш ефективним є використання в якості наповнювача BN (*hexagonal*). Додавання Al_2O_3 дає змогу підвищити теплопровідність лише на 50 %, але він дешевший.

Фірмою *ABB* було створено систему ізоляції *Micadur* [12] із підвищеною питомою теплопровідністю 0,48 Вт/(м·К) при додаванні Al_2O_3 і 0,58 Вт/(м·К) при використанні *BN* (*hexagonal*). Її застосування в практиці виробництва потужного генеруючого обладнання відкриває нові можливості по розширенню верхньої межі потужностей гідро- та турбогенераторів із повітряним охолодженням, підвищення їхньої надійності та навантажувальної здатності.

Гідрогенератор-двигун типу СВО 1255/255-40 УХЛ4 станційний № 1 Дністровської ГАЕС є головною машиною серії із семи машин, що мають бути виготовлені, змонтовані й пущені в експлуатацію в найближчі 10 років. За результатами дослідно-промислової експлуатації головного агрегату серії мають бути запропоновані, розроблені й впроваджені в наступних машинах ефективні заходи й технічні рішення щодо підвищення їхньої безпеки, надійності й енерго-екологічної ефективності.

Застосування ізоляції із підвищеною теплопровідністю дозволить знизити робочу температуру обмоток, підвищити навантажувальну здатність й подовжити ресурс гідрогенератора-двигуна.

З метою визначення кількісних показників впливу коефіцієнта теплопровідності головної ізоляції обмотки статора проведено розрахунки нагріву основних елементів обмотки статора гідрогенератора-двигуна Дністровської ГАЕС типу СВО 1255/255-40 УХЛ4.

Розрахунки виконано для двигунного режиму з номінальним навантаженням, при якому нагріву обмоток максимальні.

На рис. 7 наведено залежність максимальних температур елементарних провідників стрижня обмотки статора гідрогенератора-двигуна від коефіцієнта теплопровідності головної корпусної ізоляції обмотки. Звідки видно, що при застосуванні системи ізоляції типу *Micadur* максимальні температури обмотки статора можуть бути знижені майже на 22 °С (понад 18 %) із збереженням геометричних розмірів і без втрати діелектричної стійкості ізоляції.

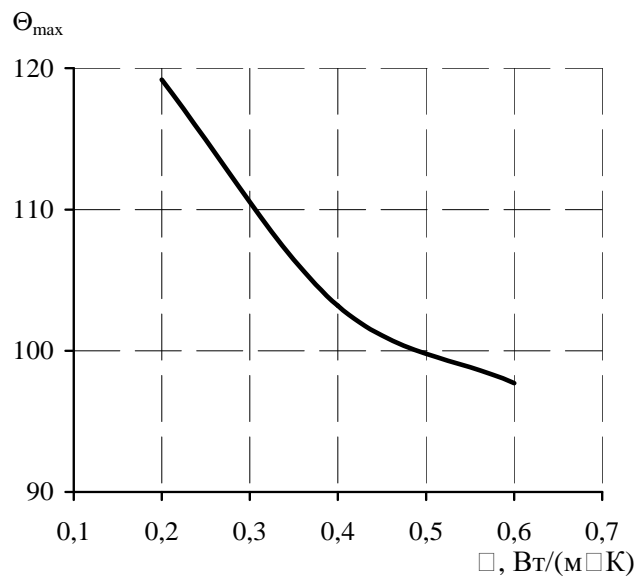


Рис. 7. Максимальна температура міді стрижня обмотки статора залежно від коефіцієнта теплопровідності головної корпусної ізоляції.

Перепад температури по товщині ізоляції стрижня обмотки при цьому може бути знижений на понад 20 °С (на 60 %).

Зниження робочої температури обмоток дозволяє подовжити ресурс ізоляції, покращити термомеханічні умови її експлуатації, підвищити навантажувальну здатність та маневрові можливості агрегату в цілому, у тому числі в режимах із споживанням реактивної потужності. Зокрема, навантаження у двигунному режимі може бути підвищене на 20 % із збереженням існуючих рівнів максимальних нагрівів.

Висновки

Добудова й пуск в експлуатацію Дністровської ГАЕС потужністю 2300 МВт (у генераторному режимі) уперше в новітній історії дасть змогу вийти українській енергетиці на оптимальні співвідношення базових і маневрених потужностей. Частка маневрених потужностей ГЕС і ГАЕС ОЕС України становитиме 12,5 % від загальних установлених потужностей, що відповідає оптимальному рівню в 10 - 15 %.

Генератор-двигун типу СВО 1255/255-40 УХЛ4, спроектований та виготовлений українськими спеціалістами ДП «Завод «Електроважмаш», на сьогодні є найпотужнішою машиною подібного типу в Європі і другою у світі і, безумовно, є досягненням українського електромашинобудування.

Одним із дієвих шляхів підвищення надійності й навантажувальної здатності машини є застосування в якості головної систем високотеплопровідної ізоляції із вакуум-нагнітальним просоченням. Що дозволяє знизити температуру обмотки статора на понад 18 % і підвищити навантаження у двигунному режимі на 20 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Шидловский А.К., Поташиник С.И., Федоренко Г.М.* Надежные гидроэлектростанции – гарант технологической безопасности и эффективной эксплуатации АЭС и ТЭС // Гідроенергетика України. – 2005. – №1. – С. 8 - 11.
2. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року* // Відомості Міністерства палива та енергетики України. Спеціальний випуск. – К.: Міністерство палива та енергетики, 2006. – 144 с.
3. *Титов В.В., Хуторецький Г.М., Загородная Г.А. и др.* Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Л.: Энергия, 1967. – 896 с.
4. *Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.* Расчет и конструкция гидрогенераторов. – М.: Высш. шк., 1964. – 260 с.
5. *Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И.* Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
6. *Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
7. *Хуторецький Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В.* Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.
8. *Тепловые испытания гидрогенератора-двигателя типа СВО 1255/255-40 УХЛ4 ст. № 1 Днестровской ГАЭС: (Заключит. отчет по НИР).* - ГР 0111U001474. – Х.: Електротязмаш, 2010. – 32 с.
9. *Marek P., Grubelnik W., Koerbler B.* High Performance Insulation System for HV Rotating Machines // Isovolt AG, System Development, A-8402 Werndorf, Austria, 10th Insucon International Conference Birmingham, 2006.
10. *Miller M.L., Emery F.T.* Thermal Conductivity of High Voltage Stator Coil Groudwall Insulation // EIC Conference in Chicago. - 1997. – P. 619 - 622.
11. *Stephan C.-E., Liptak G., Schuler R.* An Improved Insulation System for the Newest Generation of Stator Winding of Rotating Machines // Cigre Session-1994, Group 11, Rep. 11-101.
12. *Tari M., Yoshida K., Sekito S. et al. A.* A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators // Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference, Berlin, 2001.

А. П. Грубой, А. К. Шофул, А. А. Ключников, Г. М. Федоренко, О. Г. Кенсицкий

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ СТАТОРА И РОТОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГАТЕЛЯ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

Разработана математическая модель теплового состояния гидрогенератора-двигателя Днестровской ГАЭС. Проведены расчеты нагрева основных элементов статора и ротора в различных режимах нагрузки машины. Полученные результаты сопоставлены с данными тепловых испытаний гидрогенератора-двигателя. Предложены пути повышения надежности и нагрузочной способности агрегата.

Ключевые слова: гидрогенератор-двигатель, моделирование, тепловое состояние, надежность.

O. P. Gruboy, A. K. Shoful, O. O. Kluchnikov, G. M. Fedorenko, O. G. Kensitsky

**MODELING OF HEATING ELEMENTS STATOR AND ROTOR
OF HYDRO GENERATOR-MOTOR OF DNIESTER HPSPP**

The mathematical model of the thermal state of hydro generator-motor of Dniester HPSPP is worked out. The calculations of heating of basic elements of stator and rotor are conducted in the different modes of loading of machine. They got results are confronted with data of thermal tests of hydro generator-motor. The ways of increase of reliability and loading ability of aggregate are offered.

Keywords: hydro generator-motor, modeling, thermal state, reliability.

Надійшла до редакції 10.01.12