



УДК 621.313

КЕНСИЦЬКИЙ О.Г., канд. техн. наук,

Ін-т проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ СТАТОРА І РОТОРА ГІДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГУНА ТИПУ СВО 1255/255-40

Розроблено математичну модель теплового стану гідрогенератора-двигуна типу СВО 1255/255-40 УХЛ4 Дністровської ГАЕС. Проведено розрахунки нагріву основних елементів статора і ротора в різних режимах навантаження машини. Отримані результати співставлені із даними теплових випробувань гідрогенератора-двигуна. Запропоновані шляхи підвищення надійності та навантажувальної здатності агрегату.

Сьогодні гідроенергетика (в першу чергу ГАЕС) – гарант технологічної безпеки експлуатації АЕС. Як правило, ефективними, надійними і безпечними є енергетичні єдини технологічні комплекси АЕС + ГЕС + ГАЕС [1]. Розміщення ГЕС і ГАЕС поблизу АЕС, завдяки їх швидкодії, дозволяє використовувати їх і як додатковий резерв електрозабезпечення власних потреб АЕС в позаштатних та аварійних ситуаціях. Подальший розширений розвиток ядерної енергетики, передбачений Енергетичною стратегією України на період до 2030 р. [2], неможливий без випереджаючого зростання в ОЕС маневрених потужностей, частка яких в 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).

Із врахуванням 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 були прийняті припущення, що спрощують розрахунки, але істотно не впливають на їх адекватність:

1. З огляду на наявність транспозиції в пазовій і лобовій частинах стрижня обмотки статора приймаємо, що тепловиділення в міді по висоті стрижня розподілені рівномірно.
2. Вважаємо, що тепловиділення в міді обмотки полюсів ротора також розподілені рівномірно.
3. Приймаємо, що тепловиділення по довжині стрижня обмотки статора та витків обмотки полюсів ротора розподілені рівномірно.
4. Вважаємо, що теплові втрати в сталі осердя статора в осьовому напрямку також розподілені рівномірно.
5. Елементи розрахункової області розгляда-

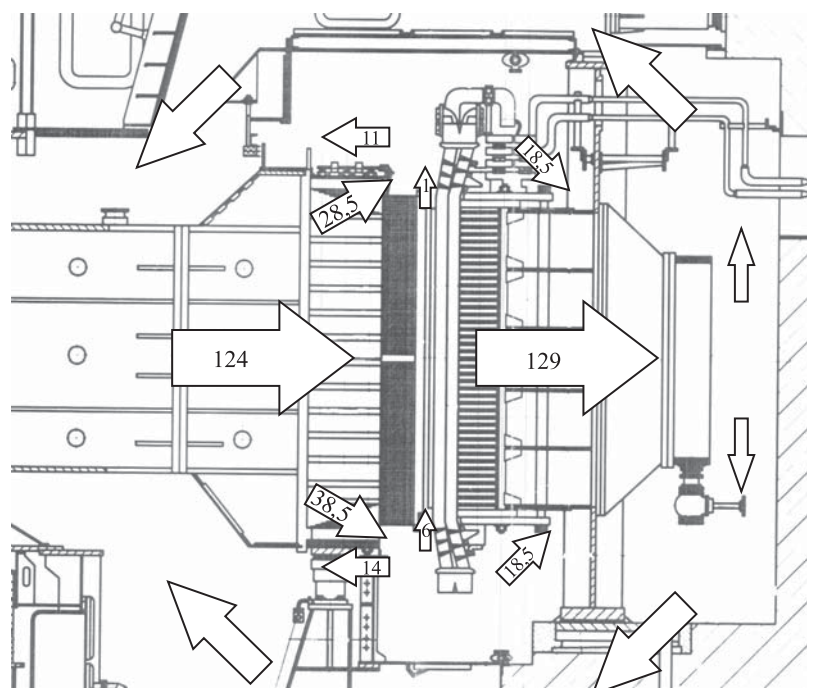


Рис. 1. Схема вентиляції гідрогенератора-двигуна СВО 1255/255-40 УХЛ4 Дністровської ГАЕС (цифра позначена всередині стрілки – розрахункова витрата повітря через відповідні канали)

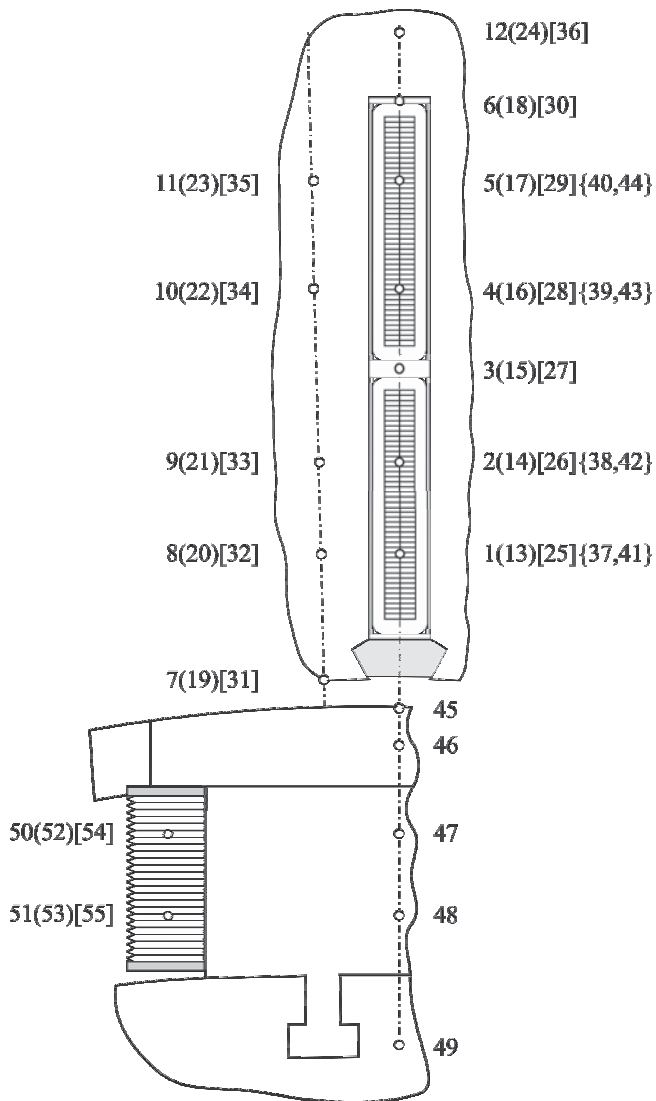


Рис. 2. Розрахункова схема статора і ротора гідрогенератора-двигуна

ються як однорідні анізотропні тіла з усередненими теплофізичними характеристиками матеріалів по відповідному напрямку в межах елементарних розрахункових об'ємів.

6. Коефіцієнти тепловіддачі з охолоджуючих поверхонь визначаються по відповідним критеріальним залежностям та експериментальним даним [6, 42, 51].

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

8. При виборі розрахункової області передбачається, що існує симетрія і періодична повторюваність елементів конструкції обмотки і осердя, умов охолодження і тепловиділень по колу статора і 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 і ротора наведені на Рис. 2.

Верхній і нижній стрижні обмотки статора в поперечному перерізі розбиті навпіл, що пов'язано із значною висотою стрижня у порівнянні з його шириною (співвідношення приблизно 5 : 1).

Аналогічно навпіл розбита по висоті обмотка полюсу ротора. Для пазової частини обмотки статора і котушки полюса ротора математично коректно описаний їх тепловий зв'язок з осердям (сталлю) статора і полюса ротора, температура яких надана у вигляді тривимірному поля. Аналогічно описаний тепловий зв'язок лобових частин обмотки статора з охолоджуючим повітрям та пазовою частиною обмотки.

Уздовж машини розрахунок виконано для п'яти перетинів статора (Рис. 3):

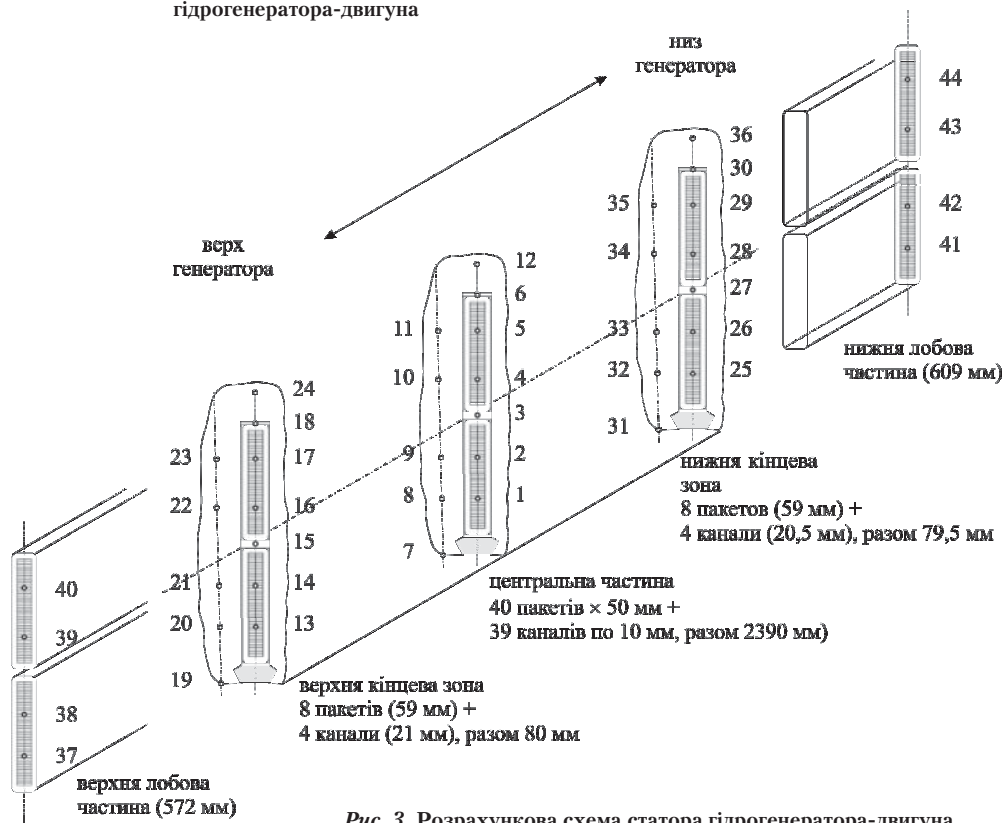


Рис. 3. Розрахункова схема статора гідрогенератора-двигуна



- 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.

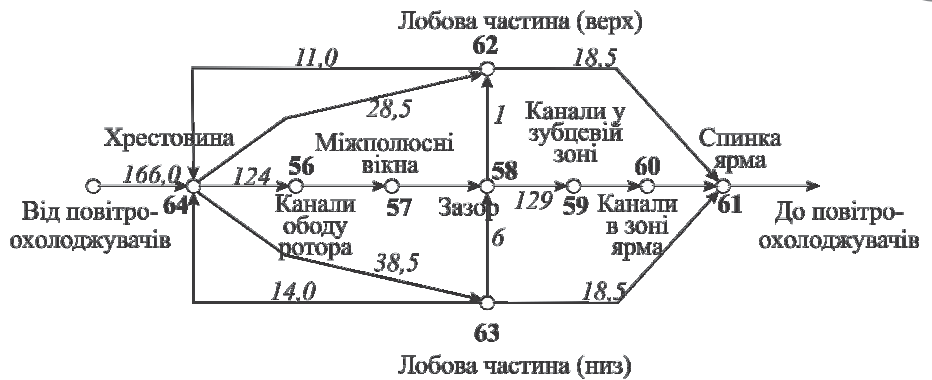


Рис. 4. Розрахункова схема циркуляції холодоагенту (повітря) у гідрогенераторі-двигуні

Позначення "нижній" та "верхній" відповідають реальному розташуванню елементів і вузлів вертикального гідрогенератора-двигуна енергоблока Дністрівської ГАЕС.

Позначення вузлів без дужок розрахункової схеми на Рис. 2 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;
- 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 міжполюсні 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 у зону над спинкою ярма (вузол 61). Сюди же через натискні гребінки також подається повітря із зон верхніх та нижніх лобових частин обмотки статора. Увесь обсяг холодоагенту із зони над спинкою ярма статора спрямовується до газоохолоджувачів.

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 у повітряний зазор між статором і ротором і далі із повітряного зазору у зону верхніх лобових частин. Обсяги циркуляції повітря (розрахункові) позначені на Рис. 4 курсивом.

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

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

Таблиця 2. Теплофізичні параметри конструкційних матеріалів й холодоагентів

Параметр	Значення
Коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К):	
- ізоляція елементарних провідників стрижня обмотки статора	0,16
- корпусна ізоляція обмотки статора	0,16
- 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 полюса ротора	72,1
Сталь обода ротора	48,8
Гаряче повітря на вході газоохолоджувача	63,2

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

Теплові втрати були розподілені по конструктивним вузлам машини відповідно до відомих співвідношень [3].

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

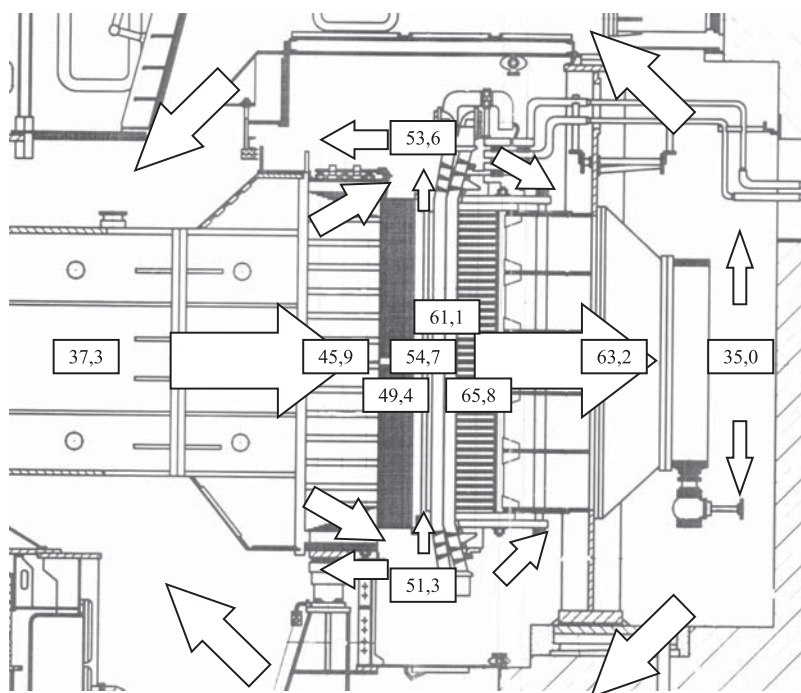


Рис. 5. Розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні у двигунному режимі (температура повітря після газоохолоджувачів – 35 °С)

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

Орієнтовно, інтенсивність теплообміну (коєфіцієнт тепловіддачі) для основних теплообмінних поверхонь визначалась виходячи із 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, отриманих із вентиляційного розрахунку (Рис. 1).

Розрахунок нагріву основних активних елементів машини було виконано відповідно до прийнятих припущень та викладених вище розрахунків втрат в окремих вузлах, параметрів теплопередачі конструктивних матеріалів та 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.

На Рис. 5 наведено розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номіналь-



ному навантаженні у двигунному режимі.

Максимум температури охолоджуючого повітря спостерігається у радіальних вентиляційних каналах осердя статора в зоні ярма і сягає $65,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. До газоохолоджувачів після змішування із повітрям із зони лобових частин холодоагент потрапляє із температурою $63,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

Основні втрати у 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.

Перераховувалися втрати в обмотках статора та 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 у генераторному режимі, спостерігається у верхніх стрижнях обмотки статора в центральній частині осердя – $95,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура лобових частин обмотки статора при цьому досягає у верхній частині статора $70,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, у нижній – $68,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обмотка полюса ротора має максимум у $87,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, сталь осердя статора – $82,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, сталь башмака полюса ротора – $75,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максимум температури охолоджуючого повітря спостерігається у радіальних вентиляційних каналах осердя статора в зоні ярма і сягає $63,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. До газоохолоджувачів після змішування із повітрям із зони лобових частин холодоагент потрапляє із температурою $61,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

Таким чином, можна відзначити, що при номінальному навантаженні і у генераторному і у

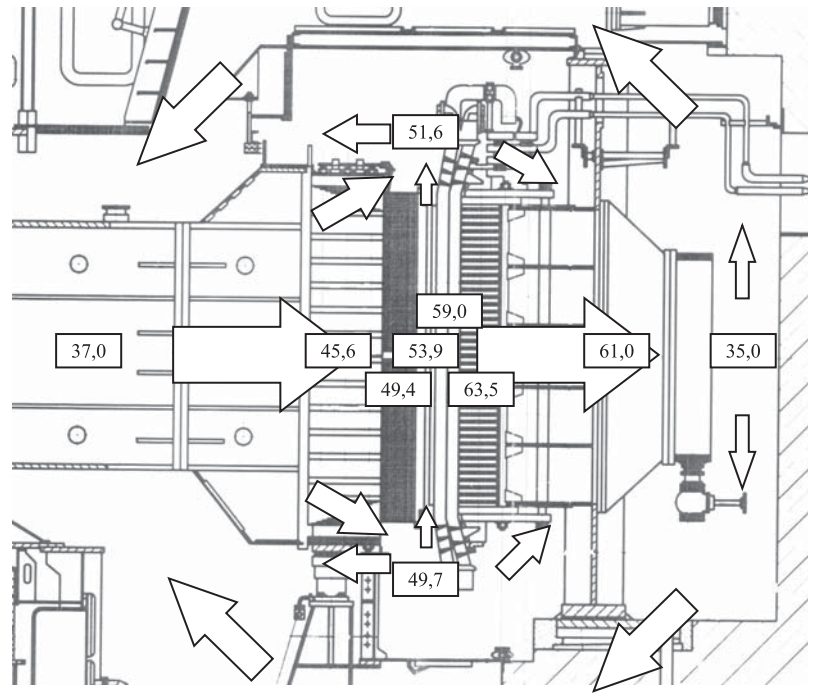


Рис. 6. Розрахункові значення температур повітря в корпусі гідрогенератора-двигуна при номінальному навантаженні у генераторному режимі (температура повітря після газоохолоджувачів – $35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

двигунному режимі максимальні температури активних елементів статора і ротора не перевищують граничних значень, обумовлених Інструкцією з експлуатації:

- для обмотки й сталі осердя статора – $120\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- для обмотки ротора – $130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

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 ($\cos\phi = 1,0$) у двигунному режимі, що становить майже 95% від номінального при, дещо завищеному коефіцієнті потужності (номінальний $\cos\phi = 0,979$).

Для проведення розрахунку нагрівів на математичній моделі відповідно до реального режиму були перераховані втрати в обмотках статора й ротора гідрогенератора-двигуна та задано

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

№	Обмотка статора			Сталь осердя статора			Обмотка ротора	Гаряче повітря
	сторона турбіни	центральна частина	сторона виводів	сторона турбіни	центральна частина	сторона 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

середню температуру холодного повітря після газоохолоджувачів (25 °С).

Отримані розрахункові та експериментальні значення нагрівів окремих зон машини зведено у Табл. 5.

Із наведених результатів можна зробити висновки, що розроблена математична модель в 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 характеру їх розподілу, пов'язані перш за все із достовірністю вихідних даних – розподілу тепловиділень по активних елементах машини, реальної циркуляції холодоагенту, врахуванням витоків тепла через конструктивні елементи енергоблока тощо.

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

В будь-якому випадку використання розробленої моделі дозволяє оцінити нагрів активних елементів статора і ротора у різних режимах навантаження, визначити ефективність застосування нових технічних рішень і конструктивних матеріалів. Особливо зазначене стосується ротора, температура якого в реальних умовах вимірюється опосередковано і по суті є середньою. В той же час необхідно знати максимальні температури і місце їх розташування у 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 і пошкодження зі всіма негативними наслідками.

При опосередкованому охолодженні обмотки статора, що маємо у нашому випадку, всі 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 і 36 – 40, відповідно).

Підвищення інтегральної теплопровідності головної корпусної ізоляції може бути досягнуте двома шляхами:

- зменшення товщини ізоляції;
- підвищенням її питомої теплопровідності.

Перший шлях передбачає наявність нових матеріалів із підвищеною діелектричною міцністю і в сучасних умовах неможливий. Другий – застосування ізоляції із підвищеною теплопровідністю – є більш доцільним і для нього існують необхідні умови.

Опубліковано ряд досліджень [8–11] 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.

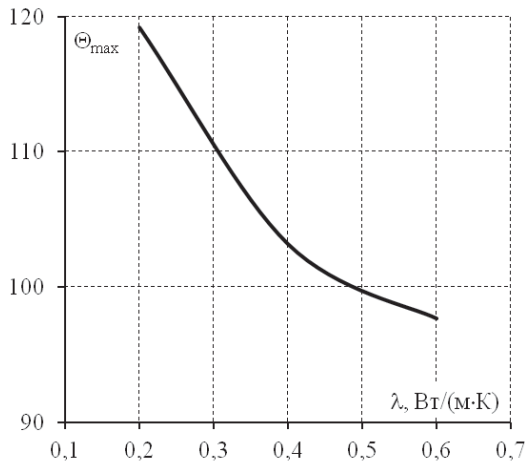


Рис. 7. Максимальна температура міді стрижня обмотки статора в залежності від коефіцієнта теплопровідності головної корпусної ізоляції

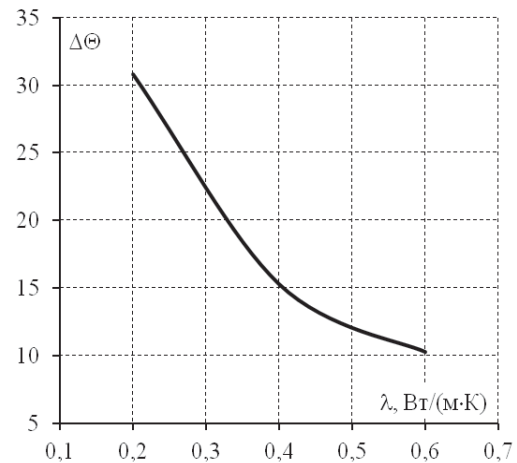


Рис. 8. Перепад температури на ізоляції стрижня обмотки статора в залежності від коефіцієнта її теплопровідності

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

Фірмою ABB було створено систему ізоляції Micadur [11] 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 у практиці виробництва потужного генеруючого обладнання відкриває нові можливості по розширенню верхньої межі потужностей гідро- та турбогенераторів із повітряним охолодженням, підвищення їх надійності та навантажувальної здатності.

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

Застосування ізоляції із підвищеною теплопровідністю дозволить знизити роботу температури обмоток, підвищити навантажувальну здатність й продовжити 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 із 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 °C (понад 18 %) із збереженням геометричних розмірів і без втрати діелектричної стійкості ізоляції.

Зниження робочої температури дозволяє продовжити ресурс ізоляції, покращити термомеханічні умови її експлуатації, підвищити навантажувальну здатність та маневрені можливості агрегату в цілому. В тому числі у 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 2268 МВт (у генераторному режимі) вперше в новітній історії дозволить вийти українській енергетиці на оптимальні співвідношення базових і маневрених потужностей. Частка маневрених потужностей ГЕС і ГАЕС Об'єднаної енергосистеми України складатиме 12,5 % від загальних установлених потужностей, що відповідає оптимальному рівню у 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.

Зниження робочої температури обмоток шляхом використання системи ізоляції із підвищеною теплопровідністю дозволяє подовжити її ресурс, покращити термомеханічні умови її експлуатації, підвищити навантажувальну здатність та маневрені можливості агрегату в цілому. В тому числі у режимах із споживанням реактивної потужності. Навантаження у двигунному режимі може бути підвищено на 20 % із збереженням існуючих рівнів максимальних нагрівів.

ЛІТЕРАТУРА

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. – Київ: Міністерство палива та енергетики, 2006. – 144 с.
3. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Варта-ньян Г.П. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Л.: Энергия, 1967. – 896 с.
4. Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В. Расчет и конструкция гидрогенераторов. – М.: Высшая школа, 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. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 256 с.
8. Marek P., Grubelnik W., Koebler B. High Performance Insulation System for HV Rotating Machines // Isovolt AG, System Development, A-8402 Werndorf, Austria, 10th Insucon International Conference Birmingham, 2006.
9. Miller M.L., Emery F.T. Thermal Conductivity of High Voltage Stator Coil Groudwall Insulation // EIC Conference in Chicago, 1997. – P. 619 – 622.
10. 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.
11. Tari M., Yoshida K., Sekito S., Allison J., Brutsch R., Lutz A. A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators // Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference, Berlin, 2001.

© Кенсницький О.Г., 2011

