

УДК 621.313.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.53.039>

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ЗАСАД ТА РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ПОТУЖНИХ ТУРБО- І ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

О.Г. Кенсицький, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: kensitsky@ukr.net

Методами системного аналізу, математичного і фізичного моделювання та натурного експерименту проведено дослідження особливостей перебігу електромагнітних, теплових та термомеханічних процесів у обладнанні в разі виникнення дефектів різної фізичної природи. Дослідження виконано для широкого діапазону експлуатаційних режимів при різному конструктивному виконанні окремих елементів і вузлів. За результатами експериментальних досліджень визначено, що на вібраційний стан як машини в цілому, так і окремих її вузлів впливають рівень навантаження та температура водню на виході з газоохолоджувачів. За часткового активного навантаження (меншого за номінальний), особливо в режимах зі споживанням реактивної потужності, та за зниженої температури холодоагенту вібрації є максимальними. Проведено порівняльний аналіз віброзбуджуючих сил у статорі турбогенератора потужністю 1000 МВт у дво полюсному та чотиріполюсному виконанні. Доведено, що в разі переходу в режими зі споживанням реактивної потужності у спектрі віброзбуджуючих сил у статорі дво полюсного турбогенератора спостерігається зростання складової подвійної частоти електромагнітних коливань (200 Гц). Проведено порівняння ефективності конструктивного виконання кінцевої зони осердя статора турбогенератора. Доведено доцільність та ефективність застосування внутрішніх розподілених електромагнітних екранів зубчастопазової конструкції. За результатами виконаних досліджень розроблено та науково обґрунтовано технічні рішення по оптимізації конструкції елементів і вузлів турбо- та гідро генераторів – схеми охолодження торцевої зони та системи запресування осердя статора, пристроїв закріплення лобових частин, а також вентиляції шліців у зубцях осердя статора. Бібл. 7, рис. 12.

Ключові слова: турбогенератор, гідро генератор, надійність, безвідмовність, наробіток до відмови, моделі, фізичні процеси.

Показники надійності генеруючого устаткування електростанцій України, а саме наробіток до відмови та коефіцієнт готовності, регламентуються стандартами ГОСТ 533-2000 для турбогенераторів і ГОСТ 5616-89 для гідро генераторів та гідро генераторів-двигунів. Так, для турбогенераторів потужністю до 350 МВт коефіцієнт готовності має бути не нижчим 0,996, а наробіток до відмови – не меншим 22000 годин. Відповідно, для турбогенераторів потужністю понад 350 МВт – 0,995 і 18000 годин. Для гідро генераторів і гідро генераторів-двигунів ці показники не повинні бути меншими 0,996 і 27000 годин.

На сьогодні показники безвідмовності генеруючого устаткування електростанцій України не відповідають наведеним вище нормам. Із турбогенераторів енергоблоків АЕС найбільш ненадійними є машини потужністю 1000 МВт у дво полюсному виконанні. Їх питома пошкоджуваність складає 0,476 на генераторо-рік експлуатації, що на порядок більше пошкоджуваності турбогенераторів потужністю 1000 МВт у чотиріполюсному виконанні (0,05) і в два рази перевищує пошкоджуваність турбогенераторів потужністю 220 МВт (0,2). Середній коефіцієнт готовності дорівнює 0,964, наробіток до відмови – 17000 годин, а для окремих енергоблоків – взагалі 8000 годин (Рівненська АЕС, блоки 3, 4) [1]. Аналогічні показники є характерними і для турбогенераторів енергоблоків ТЕС і ГЕС.

Головними причинами високої пошкоджуваності основного генеруючого обладнання електростанцій на сьогодні є:

- конструктивні недоліки устаткування;
- позаштатні режими експлуатації обладнання, зокрема участь енергоблоків у маневрених режимах, у тому числі по реактивній потужності;
- недостатня кваліфікація експлуатаційного персоналу (людський фактор).

Метою дослідження є розробка нових методів і засобів підвищення надійності та навантажувальної здатності потужних турбо- і гідрогенераторів у експлуатації шляхом створення математичних і фізичних моделей та дослідження особливостей перебігу електромагнітних, теплових та термомеханічних процесів у обладнанні в разі виникнення дефектів різної фізичної природи, а також розробка нових засобів і конструктивних рішень виконання окремих елементів і вузлів машини.

У ході виконання роботи було розроблено нову квазітривимірну модель електромагнітних і теплових процесів у торцевій зоні статора потужного турбогенератора [2], яка відрізняється від тих, що використовуються та відомі на сьогодні, більш повним урахуванням фізико-технічних факторів і високою достовірністю результатів при порівняльній простоті програмної реалізації. Розходження з експериментальними дослідженнями на реальному турбогенераторі не перевищили 20 %. Модель дозволяє оцінювати ефективність нових конструктивних і технологічних рішень, спрямованих на підвищення надійності і навантажувальної здатності генеруючого устаткування в експлуатації (геометрія, теплофізичні характеристики матеріалів, інтенсивність теплообміну).

Дослідження розподілу електромагнітного поля і нагрівів у кінцевій зоні статора потужного турбогенератора [3] у процесі зміни реактивного навантаження довели, що найбільше зростання аксіальної складової індукції в зубцях у разі переходу від номінального режиму ($\cos \varphi = 0,8$, рис. 1, а) до режиму споживання реактивної потужності ($\cos \varphi = -0,95$, рис. 1, в)

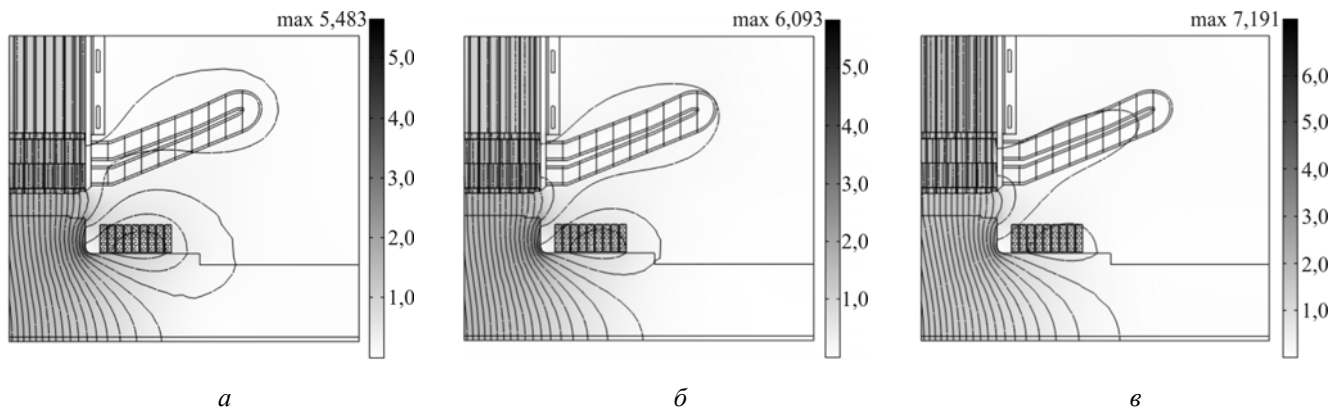


Рис. 1

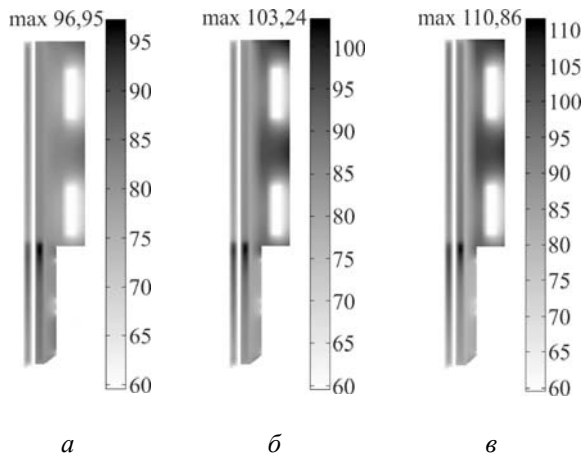


Рис. 2

спостерігається в коронках (на 30 %), дещо менше – в середній частині (на 20 %). В ярмі поблизу підпазової області індукція збільшується на 70 %. В області «натискний палець – крайній пакет» з переходом у режим недозбудження індукція зростає майже на 35 %. У другому та третьому пакетах осердя це зростання помітно менше, а в шостому – взагалі відсутнє. Найсуттєвіші збільшення індукції відбуваються в коронках зубців та поблизу підпазової області, що пояснюється екрануючим впливом мідного екрану та натискної плити.

Нагрів області «натискна плита – екран – натискний палець – крайній пакет» різко підвищується за переходу в ємнісний квадрант (рис. 2, в). Нагрів підпазової зони в режимі

споживання реактивної потужності на 20 – 25 °С вищий, ніж коронки. Максимальна температура зубцевої зони в підпазовій області крайнього пакета осердя становить 111 °С, натискної плити – 108 °С, натискного пальця – 99 °С.

Проведено дослідження температурного поля в торцевій зоні ТГ для низки варіантів її конструктивного виконання для режиму навантаження зі споживанням реактивної потужності ($\cos \varphi = -0,95$) [4]. Розглянуто чотири варіанти виконання кінцевої зони осердя статора:

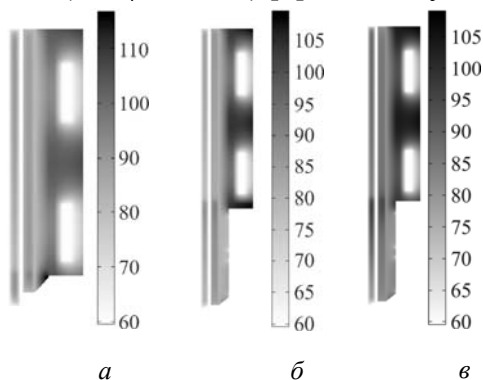


Рис. 3

- базова (заводська) конструкція (рис. 2, в);
 - виконання глибокого скосу крайніх пакетів (рис. 3, а);
 - встановлення *L*-подібного екрана під натискною плитою (рис. 3, б);
 - застосування внутрішнього розподіленого екрана крайніх пакетів (рис. 3, в).
- Визначено, що з розглянутих варіантів найбільш ефективним є встановлення електропровідного *L*-подібного екрана між натискною плитою і натискними пальцями. Максимальні температури основних елементів конструкції є найнижчими, а саме:
- крайнього пакета осердя – 92 °С (базовий варіант – 111 °С);
 - натискної плити – 105 °С (108 °С);
 - натискного пальця – 95 °С (99 °С).

Застосування структурного (внутрішнього розподіленого) екрана дозволяє зменшити максимальну температуру крайнього пакета осердя статора, але водночас збільшується середня температура пакета через наявність мідних елементів (підвищення струмів у ярмі).

Створено математичну модель та проведено дослідження термомеханічних процесів у стрижні обмотки статора потужного турбогенератора в разі порушення циркуляції холодоагента [5], що відрізняється єдиним підходом до дослідження взаємозв'язаних теплових і термомеханічних характеристик об'єкта для однієї й тієї ж міри дискретизації розрахункової області.

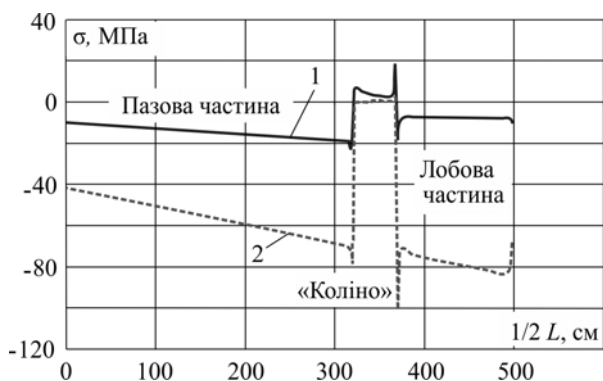


Рис. 4

(рис. 4) в радіальному напрямку (крива 2) перевищують межу міцності матеріалу ($\sigma_{гр. 110^\circ} = 40$ МПа) навіть за температур стрижня, нижчих гранично допустимих значень для терморезистивної ізоляції класу «В» (130 °С).

За результатами дослідження розподілу термомеханічних напруг в ізоляції обмотки статора в залежності від конструктивного виконання закріплення стрижня в пазу та режиму навантаження турбогенератора [6] встановлено, що за наявності «вільної ділянки» стрижня («коліно» на рис. 5):

- максимальні значення радіальних переміщень ізоляції в цій зоні зростають у 2 рази;

- базова (заводська) конструкція (рис. 2, в);
- виконання глибокого скосу крайніх пакетів (рис. 3, а);
- встановлення *L*-подібного екрана під натискною плитою (рис. 3, б);
- застосування внутрішнього розподіленого екрана крайніх пакетів (рис. 3, в).

Визначено, що з розглянутих варіантів найбільш ефективним є встановлення електропровідного *L*-подібного екрана між натискною плитою і натискними пальцями. Максимальні температури основних елементів конструкції є найнижчими, а саме:

Проведено порівняльний аналіз величин термомеханічних напруг в ізоляції стрижня, що виникають за наявності дефектів охолодження. Встановлено, що максимальні значення напруги спостерігаються на ділянках виходу стрижня з паза і в місцях кріплень лобових частин. У разі зниження витрати дистилату величини термомеханічної напруги в локальних точках ізоляції

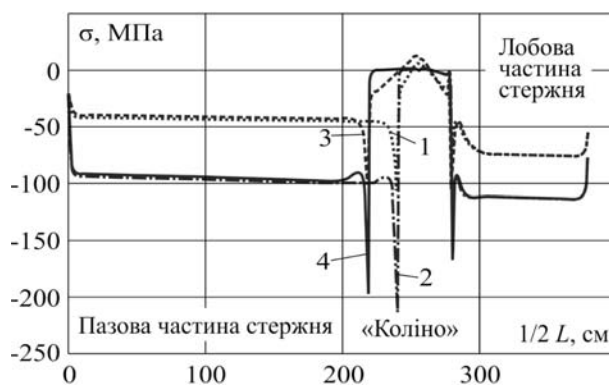


Рис. 5

– радіальна (криві 2 і 4) і аксіальна (криві 1 і 3) термомеханічні напруги в ізоляції знижуються на 8 % (1 і 2 відповідають звичайному закріпленню лобової частини, а 2 і 4 – за наявності вільної ділянки в 20 см);

– у разі навантаження турбогенератора спостерігається зміщення («міграція») локальної напруги вглиб осердя статора, внаслідок чого змінюється розподіл тиску заперування його крайніх пакетів;

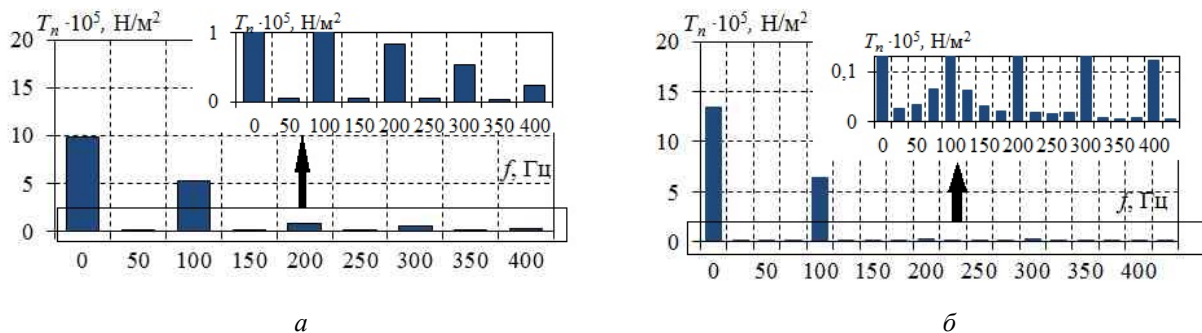


Рис. 6

– термомеханічні напруги в ізоляції обмотки зростають у зоні закріплення лобових частин обмотки бандажами (на 40 % в аксіальному та на 22 % в радіальному напрямках).

На математичній моделі електромагнітного поля турбогенератора проведено дослідження закономірностей розподілу електромагнітних вібробуджуючих сил у статорі для машин у чотириполюсному та двополюсному виконанні [7]. Проаналізовано спектральний склад сил уздовж усієї поверхні розточки статора (рис. 6). Встановлено, що вібробуджуючі сили в статорі чотириполюсних (рис. 6, б) турбогенераторів на 29 % менші, ніж у двополюсних (рис. 6, а). Їх амплітуди в чотириполюсного турбогенератора на частотах 200, 300 та 400 Гц менші, ніж у двополюсного в 2,73, 1,7 та 1,96 рази відповідно.

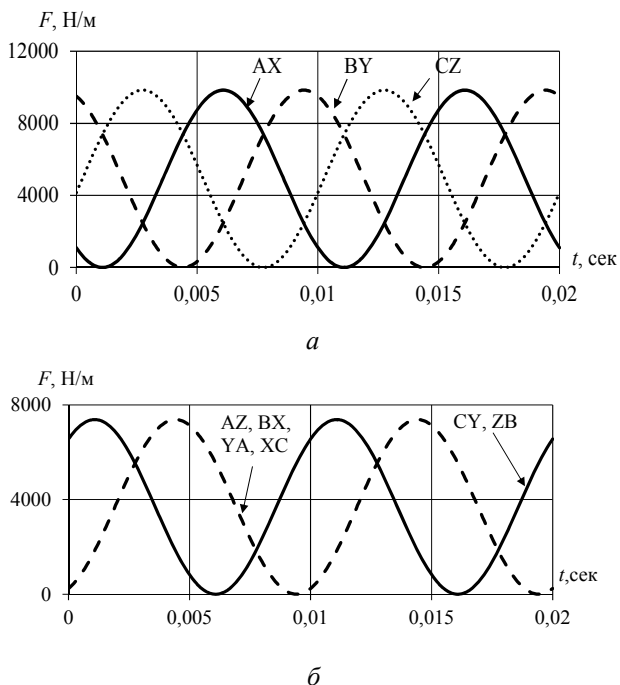


Рис. 7

Методами математичного моделювання проведено дослідження електродинамічних сил, що діють на стрижні обмотки зі струмом у пазах статора. Встановлено, що амплітуда максимальних зусиль, які діють на стрижні в пазу, що належать до однієї фази обмотки (рис. 7, а), в 1,33 рази більша за амплітуду сил, які діють на стрижні різних фаз (рис. 7, б).

На фізичній моделі кінцевої зони генератора проведено дослідження ефективності електромагнітних екранів зубчато-пазової конструкції. Виготовлено низку тризубцевих та шестизубцевих мідних сегментів завтовшки 0,5, 1,5 і 2 мм, а для вимірювання індукції магнітного поля – планку з індуктивними датчиками поля (рис. 8, а). Вимірювання вихрових струмів у екранах здійснювалось шляхом оснащення їх потенціальними зондами з базою в 10 мм і 20 мм (рис. 8, б).

На рис. 9 наведено графіки залежності аксіальної складової індукції магнітного поля в кінцевій зоні фізичної моделі від товщини екранів зубчато-пазової конструкції. Криві 1, 2 і 3 відповідають місцю розташування індуктивних датчиків (рис. 8, а). У результаті досліджень встановлено, що для припустимих товщин екрана (зазвичай до 10 мм) аксіальна складова індукції магнітного поля в крайніх пакетах осердя статора може бути зменшена в 1,7 – 2 рази. Питомі втрати у цьому випадку зменшуються у 2,5 – 4 рази.

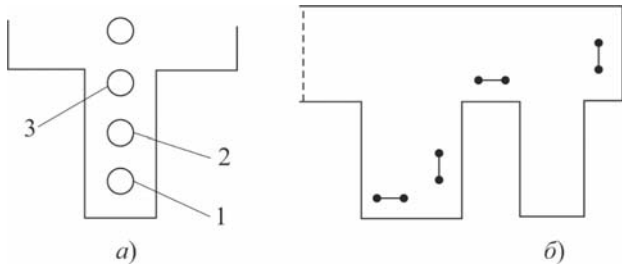
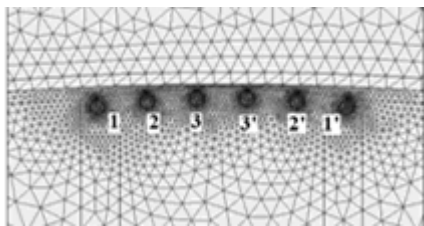


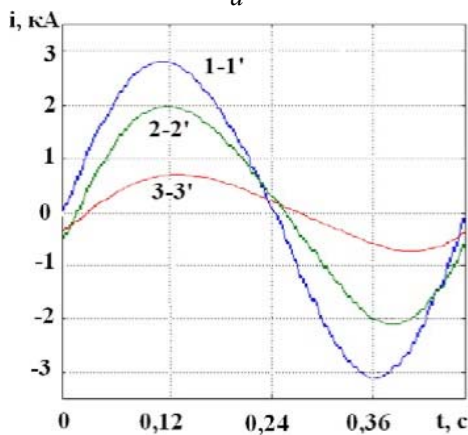
Рис. 8

Методом математичного моделювання (рис. 10, а) проведено дослідження електромагнітних процесів у демпферній системі ротора гідрогенератора за нерівномірності повітряного проміжку.

Визначено, що струми між стрижнями демпферної системи на полюсі ротора розподіляються нерівномірно. Максимальні струми протікають по крайнім від осі ротора стрижням (рис. 10, б), наслідком чого є нерівномірність втрат і нагріву стрижнів, а також внутрішні термомеханічні напруження.



а



б

Рис. 10

160 Мвар.

Встановлено, що нерівномірність розподілу вібрацій подвійної частоти (100 Гц) вздовж турбогенератора (рис. 12, а) визначається як особливостями розподілу магнітних сил, так і станом механічно поєднаних між собою елементів системи осердя і корпусу статора. На краях генератора,

Аналітичним методом проведено оцінку рівнів нагріву решітчастого екрану на торці крайнього пакета осердя статора потужного генератора. Визначено, що виконання кільцевих канавок у короткозамикаючих кільцях екрана дозволяє знизити втрати в них від основного потоку на 64 % у порівнянні з конструкцією без канавок.

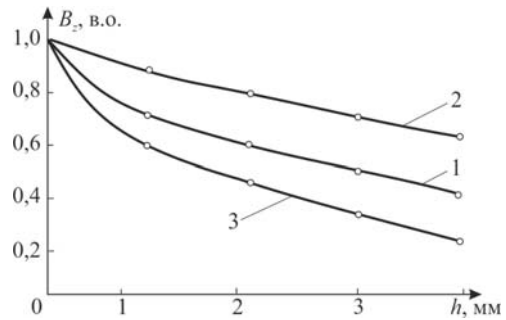


Рис. 9

Доведено, що оптимальним розташуванням демпферних стрижнів на полюсі є їх розміщення компактною групою в центральній частині полюса симетрично до його центральної осі, що в порівнянні з традиційним рівномірним розташуванням дозволяє зменшити струми в крайніх стрижнях у 1,4 – 1,6 раза, а амплітуди пульсуючих електромагнітних сил – у 2,5 – 3 рази. Кількість стрижнів на полюсі повинна бути парною та мінімально можливою з точки зору забезпечення необхідних асинхронних характеристик гідрогенератора. Окрім того, для збільшення індуктивного опору крайніх стрижнів доцільно шліци для них не виконувати, а розміщувати у закритих пазах.

На діючому турбогенераторі ТГВ-300 Трипільської ТЕС (енергоблок № 3) проведено експериментальні дослідження розподілу вібрації по поверхні корпусу машини в залежності від рівнів навантаження та температури охолоджуючого водню. Схему розташування зон вимірювання вібрації наведено на рис. 11. Режими Р3, Р4, Р5 і Р6 відповідають активному навантаженню 250 МВт і реактивному – 100, 120, 140 і

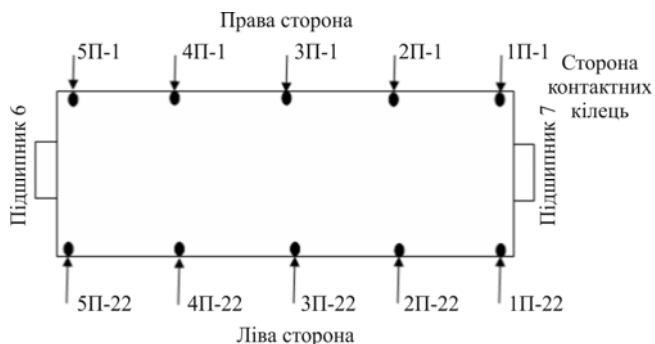


Рис. 11

де магнітні сили мінімальні, вібрації на даній частоті зменшуються. Максимальними вони є на середині машини. Величини струму і температура осердя статора визначають вібраційний стан генератора. Причому обидва фактори мають протилежний вплив на вібрації. За зростання $\cos \varphi$, коли струм зменшується, температура на середині осердя зменшується, а в крайніх пакетах – підвищується. За зменшення реактивного навантаження Q нагрів осердя статора зменшується, і вібрації повинні збільшуватись. Проте переважаючим є фактор впливу підвищення температури. У разі підвищення температури холодного газу щільність осердя статора зростає, а вібрації зменшуються.

Більш складний характер вібрації спостерігається в спектрі вищих гармонік (рис. 12, б), які характеризують стан зубців осердя статора (3 – 5 кГц). У цьому діапазоні спостерігається вплив температури холодного газу. Зростання температури поліпшує вібраційний стан зубців.

Отже, існує можливість регулюванням температури охолоджуючого газу поліпшувати вібраційний стан турбогенератора в різних режимах експлуатації, у тому числі в разі пусків у момент проходження критичних частот. Головним чином це стосується генераторів з неповним навантаженням та тих, що вичерпали свій ресурс.

На математичній моделі термомеханічних процесів проведено дослідження розподілу механічних переміщень і напруг по довжині лобової частини стрижня обмотки статора турбогенератора. Доведено, що жорстке закріплення стрижнів обмотки статора ТГ на прямолінійній ділянці після виходу її з пазу дозволяє в 2 рази знизити радіальну складову вібрації лобових частин обмотки і механічну напругу в ізоляції стрижнів.

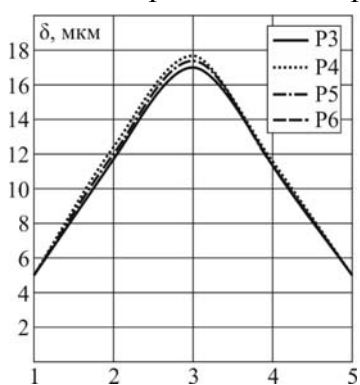
За результатами досліджень запропоновано нове технічне рішення по подовженню зони закріплення стрижнів обмотки статора кінцевими клинами після виходу їх із осердя за рахунок впровадження вдосконалених натискних пальців. Удосконалені натискні пальці, подовжені по радіусу до внутрішнього діаметра розточки статора, а також в зоні кінцевих пазових клинів, мають вирізи в стінках з боку стрижнів обмотки, співвісні з вирізами в пазах осердя. Кінцеві пазові клини збільшені по довжині і додатково закріплені у вирізах подовжених натискних пальців. Така конструкція дозволяє значно збільшити зону кріплення стрижнів обмотки статора клинами на виході з сердечника в області укорочених пакетів і скоротити довжину консольної ділянки лобової частини, що зменшує амплітуди її коливань.

З метою підвищення надійності і навантажувальної здатності турбогенератора в експлуатації запропоновано і обґрунтовано нове технічне рішення, спрямоване на зменшення максимальних температур та зниження тангенціальної нерівномірності нагріву крайніх пакетів осердя статора

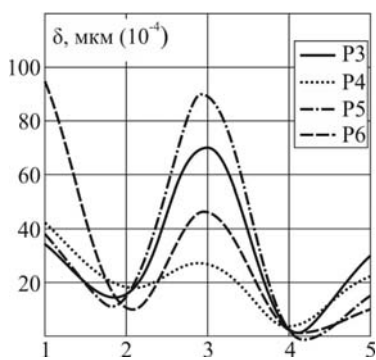
потужного турбогенератора. Для інтенсифікації охолодження сталі пакетів зубців міжфазної зони пропонується збільшити обсяг водню, що спрямовується в цю зону. Для цього вентиляційні вікна в кінцевій зоні внутрішньої рами (газорозподільного циліндра) в місцях стиків фазних зон обмотки мають бути виконані більшою площею, ніж інші вентиляційні вікна кінцевої зони. Співвідношенням робочого перерізу вікон у міжфазній зоні та поза нею має складати від 1,25 до 1,5.

Впровадження такого рішення дозволить збільшити витрату холодагенту в міжфазних зонах, підвищити його швидкість, наслідком чого буде зростання коефіцієнта тепловіддачі з теплообмінних поверхонь.

Досвід експлуатації потужних турбо- та гідрогенераторів свідчить про те, що часто, внаслідок циклічних термомеханічних навантажень, підвищених вібрацій тощо, відбувається мимовільне відкручування гайок стяжних призм, що і є причиною послаблення зусиль



а



б

Рис. 12

запресування осердя статора. Запропоновано і обґрунтовано нове технічне рішення, спрямоване на забезпечення можливості контролю відповідності положення гайок стяжних призм його первинному стану в процесі експлуатації машини.

На зовнішній поверхні гайок стяжних призм встановлюються шайби, які зафіксовані в тангенціальному напрямку. Кожна шайба механічно жорстко пов'язана з ізольованим провідником, один кінець якого має електричний контакт з гайкою, а сам ізольований провідник жорстко закріплений на натискній плиті таким чином, що дозволяє відкручувати гайки на заздалегідь встановлений кут. Ізольований провідник має розрив у вигляді електричного роз'єму, розташованого між шайбою і місцем закріплення ізольованого провідника на натискній плиті, а його другий кінець має вихід за межі корпусу машини. У процесі експлуатації генератора поступово відбувається ослаблення пресування осердя і нерівномірне відкручування окремих гайок. Під час відкручування гайок відбувається натягування частини ізольованого провідника між гайкою і місцем його кріплення до натискної плити з наступним роз'єднанням електричного роз'єму. Факт відкручування гайки встановлюється по відсутності «землі» на провіднику, що виходить за межі машини.

З метою інтенсифікації відводу теплових втрат в шліцах, виконаних в зонах концентрації торцевого поля крайніх пакетів осердя статора – зубцях і в області дна паза, запропоновано нове технічне рішення, яке полягає в тому, що вентиляційні отвори в сегментах пакетів осердя зроблено таким чином, що в тілі пакетів утворюються криволінійні вентиляційні канали з плавним поворотом на 180° з одного вентиляційного каналу між пакетами в сусідній вентиляційний канал між пакетами. У залежності від співвідношень радіусу скруглення границі каналу та його діаметру коефіцієнт місцевих втрат тиску може бути зменшений у 5 разів, внаслідок чого збільшується сумарна витрата холодоагенту. Через ступінчастість бічної поверхні каналу (пакет набраний з листів заліза) збільшується турбулізація потоку. Все це разом призводить до збільшення коефіцієнта тепловіддачі в шліцах, зменшення нагрівів найбільш напружених у тепловому відношенні зон.

Результати виконаних досліджень у вигляді математичних моделей електромагнітних, теплових та термомеханічних процесів у активних елементах потужних електричних машин, а також науково-практичних рішень будуть використовуватися на Державному підприємстві «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) при проектуванні, виготовленні та модернізації турбо- та гідрогенераторів.

У ході виконання роботи була захищена одна докторська (2014 р.) та дві кандидатські дисертації (2015 і 2018 рр.). Видано 33 публікації, в тому числі одна монографія. Розроблені технічні рішення по конструктивному виконанню елементів і вузлів турбо- і гідрогенераторів захищено чотирма патентами України.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток наукових засад та розробка засобів підвищення показників безвідмовності потужних турбо- і гідрогенераторів» (шифр «Безвідмовність»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0114U000087.

1. Кенсичкий О.Г., Федоренко Г.М. Надійність генеруючого обладнання та перспективи розвитку атомної енергетики в Україні. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2016. Вип. 26. С. 69 – 74.
2. Кенсичкий О.Г., Хвалин Д.И., Кобзарь К.А. Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагретов торцевой зоны мощного турбогенератора. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2019. № 62 (1). С. 37 – 46.
DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>
3. Кенсичкий О.Г., Хвадін Д.І. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 62 – 68.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.062>
4. Кенсичкий О.Г., Крамарський В.А., Кобзар К.О., Хвалин Д.І. Нагрів кінцевої зони статора турбогенератора при різних варіантах її конструктивного виконання. *Восточноевропейский научный журнал (East European Scientific Journal)*. 2018. 9 (37). Частина 1. С. 46 – 52.
5. Кучинский К.А. Влияние нарушения циркуляции дистиллята на термомеханические напряжения в изоляции

- обмотки статора турбогенератора мощностью 800 МВт. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 75 – 80.
6. Кучинский К.А. Термонапряженное состояние изоляции обмотки статора турбогенератора при различных вариантах ее крепления в торцевой зоне сердечника. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 43. С. 65 – 70.
7. Васильковський Ю.М., Мельник А.М. Електромагнітні вібробуджуючі сили у потужних дво- та чотириполюсних турбогенераторах АЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 60 – 66.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.060>

УДК 621.313.3

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ МОЩНЫХ ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

О.Г.Кенсичкий, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Проведен анализ надежности генерирующего оборудования электростанций Украины. Получены показатели надежности и определены основные, наиболее повреждаемые элементы и узлы гидро- и турбогенераторов, а также возможные режимные и конструктивные факторы возникновения повреждений. Методами системного анализа, математического и физического моделирования, а также натурного эксперимента проведены исследования особенностей электромагнитных, тепловых и термомеханических процессов в оборудовании при возникновении дефектов различной физической природы. Исследования выполнены для широкого диапазона эксплуатационных режимов при разном конструктивном исполнении отдельных элементов и узлов. Доказано, что максимальные нагревы имеют место в крайнем пакете в зоне дна паза в режимах потребления реактивной мощности. В результате экспериментальных исследований определено, что на вибрационное состояние как машины в целом, так и отдельных ее узлов влияют уровень нагрузки и температура водорода на выходе из газоохладителей. При активной нагрузке, меньшей номинальной, особенно в режимах с потреблением реактивной мощности, и пониженной температуре хладагента наблюдаются максимальные вибрации. Проведен сравнительный анализ вибрационных сил в статоре турбогенератора мощностью 1000 МВт в двухполюсном и четырехполюсном исполнении. Определено, что при переходе в режимы с потреблением реактивной мощности в спектре вибрационных возбуждающих сил в статоре двухполюсного турбогенератора наблюдается рост составляющей двойной частоты электромагнитных колебаний (200 Гц). Проведено сравнение эффективности конструктивного исполнения концевой зоны сердечника статора турбогенератора. Доказана целесообразность и эффективность применения внутренних распределенных электромагнитных экранов зубчато-пазовой конструкции. По результатам выполненных исследований разработаны и научно обоснованы технические решения по оптимизации конструкции элементов и узлов турбо- и гидрогенераторов – схемы охлаждения торцевой зоны и системы запрессовки сердечника статора, устройств закрепление лобовых частей, а также вентиляции шлицов в зубцах сердечника статора. Библ. 7, рис. 12.

Ключевые слова: турбогенератор, гидрогенератор, надежность, безотказность, наработка на отказ, модели, физические процессы.

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC GROUNTS AND ELABORATION OF MEANS TO INCREASE THE RELIABILITY INDICES OF TURBO- AND HYDROGENERATORS

O.H. Kentsytskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

The analysis of generating equipment reliability of electric power plants of Ukraine is made. Indices of reliability and the main most damaged elements and parts of hydro- and turbogenerators, also possible condition and constructive factors of damages beginnings are determined. With help methods of systems analysis, mathematical and physical simulation, also natural experiment are made researches of electromagnetic, heat and thermomechanical processes features in equipment at beginnings of various physical character defects. Researchers are made for wide diapason of working modes at the different design of separate elements and parts. The maximum heating take place in an end packet under-slot zone under the conditions of reactive power consumption is proved. As a result of experimental investigations is determined, the load level and hydrogen temperature at the end of gas-coolers have an influence on a vibration state both machines in general and its separate parts. Vibration have maximum at the active load less nominal value, especially under the conditions of reactive power consumption, and low temperature of refrigerant. The comparative analysis of vibration force in stator turbogenerator with 1000 MW power in two-polar and four-polar

implementation is made. It is determined while crossing to conditions of reactive power consumption in a spectrum of vibration exciting force in a stator two-polar turbogenerator there is increase of double frequency component of electromagnetic oscillation (200 Hz). Comparison of effectiveness the design of stator core end zone of a turbogenerator is made. The expediency and efficiency of use the electromagnetic internal distributed tooth-slot design shields are proved. The technical solutions of optimization the design of elements and parts turbo- and hydrogenerators – the schemes of end zone cooling and the system of stator core pressing, devices of frontal part fastening, also ventilation of slits in stator core teeth in accordance with results of researches are developed and scientific substantiation. References 7, figures 12.

Keywords: turbogenerator, hydrogenerator, reliability, unfailling, running to failure, models, physical processes.

1. Kesytskyi O.H., Fedorenko G.M. Reliability of the generating equipment and prospect of development of nuclear power in Ukraine. *Problems of nuclear power plants' safety and of Chernobyl. Scientific and technical collection*. 2016. No 26. Pp. 69 – 74. (Ukr)
2. Kesytskyi O.H., Hvalin D.I., Kobzar K.O. The mathematical model of coupling calculation the electromagnetic field and heats of the end zone powerful turbogenerator. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019. No 62 (1). Pp. 37 – 46. (Rus)
DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>
3. Kesytskyi O.H., Hvalin D.I. The end zone turbo generator electromagnetic field for changes the reactive load. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 1. Pp. 62 – 68. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.062>
4. Kesytskyi O.H., Kramarskyi V.A., Kobzar K.O., Hvalin D.I. Heating of stator end zone of turbogenerator at different variants it structural implementation. *East European Scientific Journal*. 2018. 9 (37), part 1. Pp. 46 – 52. (Ukr)
5. Kuchynskyi K.A. Effect on circulation disorders distillate on thermomechanical stresses in isolation of the stator winding of the turbogenerator by power 800 MW. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. No 1. Pp. 75 – 80. (Rus)
6. Kuchynskyi K.A. The thermostressed state of isolation of the winding of the stator of the turbogenerator at various alternatives of its fastening in the end face of the core. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 43. Pp. 65 – 70. (Rus)
7. Vaskovskyi Yu.M., Melnyk A.M. Electromagnetic vibration disturbing forces of powerful two- and four-pole turbogenerators of nuclear power plants of Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 3. Pp. 60 – 66. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.060>

Надійшла 17.05.2019
Received 17.05.2019