

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11>
УДК 658.62.018.012

¹**О. О. ОВЧАРОВ,**

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0764-4063>

¹**К. А. КОТЕЛЕВЕЦЬ,**

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kyrylo.ktl@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8811-8848>

¹*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНИХ ПІДХОДІВ ДО ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ АЕС

Анотація. У статті розглянуто проблему вдосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання атомних електростанцій, зокрема стрижнів обмотки статора турбогенераторів типу ТВВ-1000. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки в умовах понадпроектної експлуатації енергоблоків та розробки відповідних нормативних програм для проведення технічної діагностики. В роботі на основі проведеного огляду сучасних міжнародних та вітчизняних стандартів та аналізу новітніх методів теплової та неінвазивної діагностики пропонується поетапна нормативна програма проведення діагностики витрат охолоджувальної води в системі охолодження стрижнів статора турбогенератора, яка базується на застосуванні ультразвукового витратоміра та алгоритмах теплотехнічного аналізу. Визначено критерії оцінки технічного стану стрижнів і запропоновано відповідні корегувальні дії при виявленні відхилень в період плано-попереджувальних робіт для енергоблоків атомних електростанцій. Отримані результати можуть бути інтегровані у PLiM-системи управління ресурсом турбогенераторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: турбогенератор, стрижні, тепловіддача, технічна діагностика, нормативні рекомендації.

Як цитувати: Овчаров О. О., Котелевець К. А. Удосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання АЕС. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 119-128.
<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11>

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Забезпечення надійності та безпеки функціонування атомних електростанцій (АЕС) є пріоритетним завданням в умовах довгострокової експлуатації енергоблоків. Одним із ключових елементів в системі забезпечення безпеки є своєчасна та якісна технічна діагностика енергообладнання, яка дозволяє виявляти потенційні дефекти, прогнозувати відмови, порушення умов експлуатації і запобігати аварійним ситуаціям. Сучасні нормативні документи, що регламентують діагностування технічного стану обладнання АЕС, потребують періодичного оновлення та вдосконалення у відповідь на технологічний прогрес, зміни в умовах експлуатації та накопичений досвід функціонування об'єктів атомної енергетики.

На сьогодні особливої актуальності набуває адаптація нормативних підходів до умов

тривалої експлуатації, з урахуванням старіння матеріалів, зношування елементів енергосистем, появи нових методів діагностики та аналітичного прогнозування. Недостатня точність або застарілі підходи до технічного контролю можуть стати джерелом додаткових ризиків для енергоблоків, що експлуатуються понад проектні строки [1-3].

Мета даної роботи – обґрунтувати необхідність удосконалення чинної нормативної бази та запропонувати оновлені підходи до технічної діагностики енергообладнання АЕС. У статті проаналізовано існуючі нормативні вимоги, виявлено їхні обмеження, а також окреслено напрямки гармонізації з міжнародними стандартами та сучасними практиками оцінювання технічного стану обладнання.



Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі останніх років активно досліджуються питання підвищення надійності та безпеки атомних електростанцій, зокрема шляхом впровадження сучасних методів діагностики та удосконалення нормативної бази [4, 5]. Удосконалення технічної діагностики енергетичного обладнання атомних електростанцій, зокрема стрижнів турбогенераторів, є одним із ключових напрямів забезпечення їхньої надійної та безпечної експлуатації [6, 7]. Сучасні наукові дослідження зосереджуються на розвитку методів неінвазивного контролю, аналізу теплопровідності та нормативного супроводу діагностичних процедур. Дослідження зосереджені на використанні теплових, вібраційних та електромагнітних методів діагностики. Зокрема, особлива увага приділяється стрижневій зоні обмоток статора, як одній з критичних у контексті деградації теплофізичних характеристик.

Останні роботи [8-10] свідчать про зростання інтересу до теплової діагностики обмоток статора, оскільки зниження тепловіддачі у стрижнях може бути маркером пошкоджень або погіршення контакту. Розрахункове моделювання теплопровідності стрижнів дозволяє не лише виявити небезпечні зони, але й прогнозувати подальший технічний стан обладнання.

У нормативній сфері також спостерігається активне оновлення підходів до технічної діагностики [11-15]. Наприклад, рекомендації МАГАТЕ [13] та оновлені стандарти IEEE [14, 15] містять положення щодо діагностики перегріву, часткових розрядів і старіння ізоляції обмоток, акцентуючи на важливості інтерпретації результатів у контексті довгострокової експлуатації. Крім того, все більшого поширення набувають цифрові інструменти прогнозування діагностики. Застосування цифрових двійників турбогенераторів для моніторингу теплових і електромагнітних параметрів дозволяє інтегрувати діагностику у систему управління надійністю [16, 17].

Таким чином, удосконалення нормативних підходів до діагностики стрижнів турбогенераторів потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує теплотехнічне моделювання, сучасні засоби моніторингу та адаптацію міжнародних стандартів до умов конкретних АЕС. Сучасна наукова думка сходиться на тому, що ефективне технічне діагностування стрижнів турбогенераторів повинне поєднувати: моделювання теплових характеристик, використання неінвазивних методів контролю, оновлення нормативно-правових вимог до діагностики обладнання в умовах довгострокової експлуатації.

Методика технічної діагностики в контурі охолодження стержнів обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000

Забезпечення надійної тепловіддачі у стрижнях обмотки статора турбогенераторів є критично важливим аспектом їх безпечної експлуатації. У контексті довгострокової експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000-2УЗ, що встановлені на енергоблоках українських АЕС, пропонується впровадити в нормативне забезпечення комплексну методику технічної діагностики, спрямовану на своєчасне виявлення порушень у системі охолодження та попередження аварійних ситуацій (Рис. 1).

Першочергово проводиться аналіз технічної документації, схем охолодження та конструктивних особливостей обмотки статора. Визначаються контрольовані елементи – стрижні обмотки, через які циркулює деіонізована вода як охолоджувальне середовище. Встановлюються допустимі параметри температури, витрати теплоносія та теплопровідності, які слугують еталонними для подальших оцінок.

На наступному етапі проводиться технічна діагностика за основними методами, що включають різні види та методи контролю.

За нормативними вимогами, проводиться вимірювання температур на вході та виході охолоджувального каналу кожного стрижня з метою визначення ефективності охолодження та можливої закупорки каналу. Також, визначається інтенсивність водообміну у кожному каналі за допомогою витратомірів з метою виявлення відхилення від норми (зокрема, різке зниження або нульове значення витрати), що може свідчити про дефекти в контурі охолодження або критичне забруднення. Використовуючи розрахункову модель теплопередачі, оцінюється тепловіддача кожного стержня. Додатково вимірюється опір ізоляції обмотки та втрати на діелектричні струми, що можуть свідчити про порушення герметичності охолоджувального каналу або зволоження ізоляції. Також проводиться тепловізійний та акустичний контроль (опціонально) в умовах зупинки або зниженого навантаження для виявлення локальних зон перегріву, а також застосовуються неруйнівні методи контролю (ультразвуковий, вихрострумний тощо) для уточнення стану металу.



Рис. 1 – Візуалізація етапів технічної діагностики стрижнів обмотки статора турбогенератора
Fig. 1 – Visualization of the stages of technical diagnostics of the stator winding rods of a turbogenerator

На наступному етапі за результатами діагностики встановлюється технічний стан кожного стрижня:

- Нормальний стан - тепловіддача $> 1,0$ Вт; стабільна температура та витрати.
- Гранично припустимий стан тепловіддача в межах $0,5\text{--}1,0$ Вт; потребує посиленого моніторингу.
- Критичний стан - тепловіддача $< 0,5$ Вт або нульова витрата; необхідна негайна заміна.

У випадку виявлення порушень тепловіддачі пропонується введення коригувальних дій, що можуть включати профілактичні та відновлювальні роботи:

- Промивання та очищення охолоджувальних каналів.
- Заміна окремих стрижнів або секцій обмотки.
- Корекція параметрів теплоносія (температура, тиск, склад).
- Внесення змін до графіків технічного обслуговування з урахуванням виявлених дефектів.

Усі результати вимірювань, розрахунків і виявлених дефектів фіксуються в технічному журналі. Інформація включається до паспортів обладнання та баз даних системи технічного обслуговування та ремонту (ТОiP) та у систему технічної експлуатації турбогенера-

тора (як частина PLiM — Plant Life Management).

Нормативна програма, що пропонується, визначає етапи випробувань з діагностики витрати охолоджувальної води (дистилату) в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000 і встановлює склад, зміст і послідовність проведення робіт з обстеження турбогенератора ТВВ-1000 з використанням ультразвукового методу контролю. Роботи виконуються під час планових капітальних ремонтів турбогенератора і враховують загальні вимоги до документації щодо проведення обстеження та результати випробувань, які повинні оформлятися протоколами та реєструватися в журналі обліку результатів контролю відповідно до вимог.

Метою випробувань є отримання об'єктивних даних щодо витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора ультразвуковим методом, який використовується для оцінки технічного стану системи охолодження стрижнів обмотки статора і турбогенератора в цілому.

Введення технічного параметра «витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статор» для оцінки стану турбогенератора обумовлено:

- відсутністю діагностики даного параметра (конструкція турбогенератора типу ТВВ-1000, що експлуатуються на енергоблоках АЕС України, не передбачає встановлення датчиків вимірювання витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора);

- спрацьовуванням захистів по перевищенню температури обмотки статора;

- збільшеною кількістю порушень умов нормального функціонування окремих вузлів і деталей турбогенератора (пошкодження обмотки статора, роз'єднання розпірно-клинових вузлів лобових частин, зламки елементарних провідників стрижнів у місцях пайки їх до наконечників, порушення герметичності системи водяного охолодження обмотки статора), які обумовлені електричними та тепломеханічними процесами.

Нормативна програма передбачає відпрацювання методології визначення витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора за допомогою ультразвукового витратоміра, що забезпечує отримання точної і надійної оцінки швидкості потоку в трубопроводах без розущільнення системи охолодження. За результатами вимірювань необхідно провести порівняльний аналіз отриманих в ході випробувань значень витрати охолоджувальної води з розрахунковими (теоретичними) даними і результатами попередніх вимірювань для подальшого визначення динаміки зміни стану внутрішніх поверхонь трубопроводів охолодження стрижнів обмотки статора, а також порожнистих провідників стрижнів обмотки. У разі відсутності даних попередніх вимірювань результати поточного вимірювання при розрахунках будуть вважатися вихідними.

Отримання достовірних даних щодо витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора ТГ необхідно для вирішення таких завдань: оцінка технічного стану ТГ; підвищення експлуатаційної надійності; визначення допустимих робочих параметрів ТГ; оптимізація структури ремонтного циклу; оптимізація витрат на проведення ремонтних робіт і модернізацію обладнання.

При підготовці системи охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора до випробувань виконати наступні роботи:

- персонал, який виконує випробування, повинен вивчити послідовність і методику їх проведення, а також заходи безпеки та умови проведення робіт;

- насоси подачі охолоджувальної води в колектор включити, систему охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора заповнити дистиллятом і знеповітрити;

- підготувати вимірювальні прилади, що використовуються при випробуваннях;

- підготувати і перевірити відповідні дрти для складання випробувальних схем;

- зафіксувати значення вологості, температури і тиску в приміщенні.

Перед виконанням випробувань провести зовнішній огляд:

- щільність закріплення обмотки в пазах;

- встановлення клинів по довжині паза (азори, збіг вентиляційних каналів);

- виповзання підклинових прокладок у бік лобових частин;

- стану пазових клинів;

- кріплення шлангів водопідведення, їх деформацію, розтріскування;

- кріплення колекторів;

- стан ущільнювачів;

- стан мережі заземлення.

Якщо під час огляду виявлено зовнішні пошкодження, вони повинні бути усунені до початку випробувань. Також, необхідно провести спеціальні випробування обмотки статора на гідравлічну та газову щільність, оскільки нещільності водяного тракту призводять або до потрапляння водню в систему охолоджувальної води, що порушує нормальну циркуляцію води і викликає перегрів ізоляції стрижнів, або до потрапляння води всередину корпусу статора, що знижує електричну міцність обмотки статора. Перед початком основного етапу (рис.1) необхідно перевірити параметри, що характеризують вихідний стан системи охолодження стрижнів обмотки статора, а саме: тиск дистилляту в колекторі водяного охолодження; температури дистилляту кожного стрижня; якість дистилляту рН, R, Cu, O₂; вміст водню в пастці; механічні домішки; технологічну сигналізацію. Якщо показники параметрів, що характеризують вихідний стан системи охолодження стрижнів обмотки статора, відрізняються від прийнятих норм (табл.1), має бути прийнято рішення про подальше проведення випробувань.

Таблиця 1
Нормативні показники якості дистиляту
Table 1
Standard indicators of distillate quality

Позначення	Параметр	Значення параметру
R, кОм/см ²	Питомий електричний опір при температурі 25 °С, не більше	200
pH	Показник pH при температурі 25 °С,	8,5 ± 0,5 %
O ₂ , мкг/кг	Вміст кисню, не більше	400
Cu, мкг/кг	Вміст сполук міді, не більше	100

Вимірювання для визначення витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора проводиться на фторопластових трубопроводах без розушільнення конструкції контуру охолодження.

Характеристики місця вимірювання наступні:

- фторопластовий трубопровід, зовнішній діаметр 28,0 мм, товщина стінки 3 ± 0,5 мм;

- наявна пряма ділянка до 200 мм;

- тиск охолоджувальної води від 1,0 кгс/см² до 5,0 кгс/см²;

- температура поверхні стрижнів на зупиненому турбогенераторі від 25 °С до 30 °С.

Вимірювання проводиться за допомогою портативного імпульсного витратоміра-лічильника рідини FLUXUS ADM F601(F). Основними функціональними характеристиками витратоміра є:

- графічний РК-дисплей;
- інтерфейс RS232/USB;
- вихід 4-20 mA;
- можливість роботи в якості теплотічильника і вимірювання товщини стінки трубопроводу;
- два ультразвукових накладних датчика;
- точність вимірювання - 0,1% вимірюваного значення ± 15 μA;
- пам'ять більше 100000 точок вимірювання;
- частотний вихід – діапазон 0...5 кГц.

Технологія витратоміра дозволяє проводити точне двонаправлене вимірювання витрати за рахунок використання неінвазивного методу з накладними датчиками і протистояти таким несприятливим факторам, як електричні наведення на систему від сусідніх силових кабелів і короткочасним перешкодам для акустичного сигналу (рис. 2).

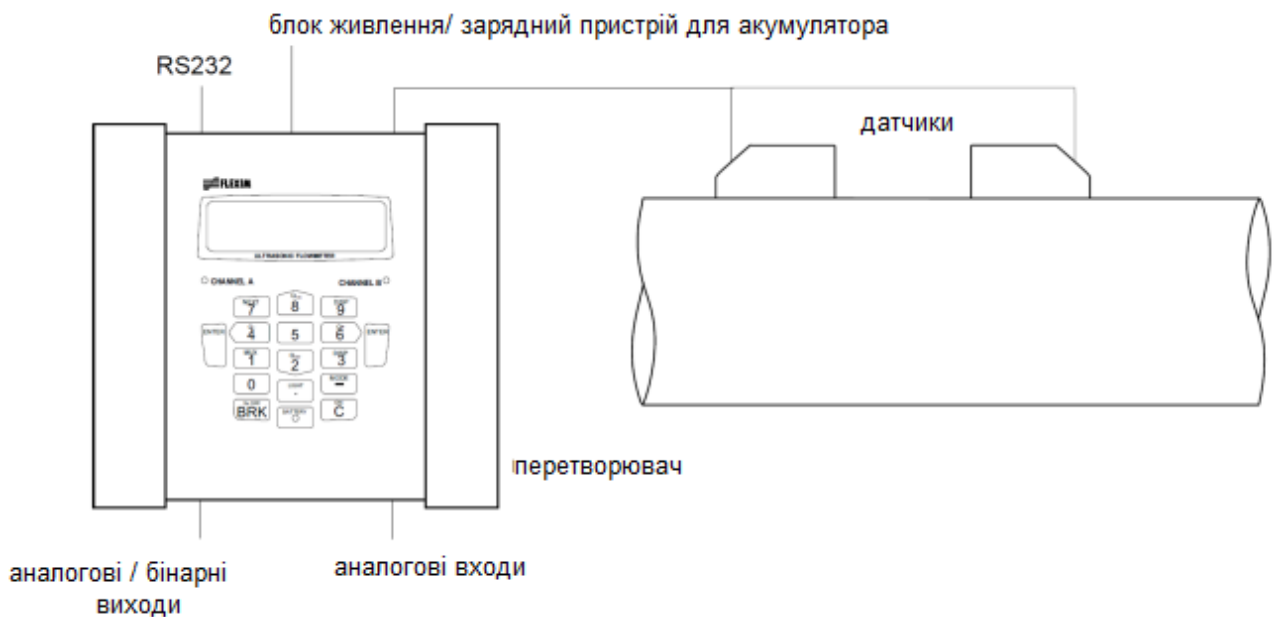


Рис. 2– Вимірювальна схема витратоміра
Fig. 2 – Flowmeter measurement diagram

Вимірювання витрати води проводяться на зливні охолоджувальної води (з боку турбіни) на гідравлічних гілках. Крім вимірювання витрати виконуються вимірювання швидкості потоку охолоджувальної води на виходах з водяних камер кожного стрижня обмотки статора ТГ, витрати охолоджувальної води у відводах від зливного колектора, температури охолоджувальної води у вихідному (зливному) колекторі, товщини стінок фторопластових трубопроводів. Результати кожного проведеного вимірювання повинні бути зведені в таблицю протоколу випробувань, який містить виміряні параметри якості дистилату в порівнянні з нормативними (табл. 1) та вимірювання витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора з вказанням наступних параметрів: витрата, л/с; діаметр трубопроводу, мм; товщина стінки трубопроводу, мм; витрата від зливного колектора, м³/год; тиск води, кг/см²; температура води на вході та на виході, °C.

Операції з вимірювання розпочинаються після проведення високовольних випробувань ізоляції обмоток статора турбогенератора і заповнення дистилатом системи охолодження стрижнів обмотки. Вибравши одну з гідравлічних гілок стрижнів обмотки необхідно встановити вимірювальні накладні датчики ультразвукового контролю на фторопластовому трубопроводі на прямій ділянці трубопроводу, на виході дистилату з водяних камер головок стрижнів обмотки, попередньо підготувавши поверхню трубопроводу (нанесення гелю) та підключити витратомір. Час вимірювання – до отримання сталого сигналу, але не менше 30 с. При цьому фіксація значень витрати проводиться щосекунди на всьому протязі отримання сталого сигналу для

мінімізації помилок при виконанні операцій. Нумерацію трубопроводів охолоджувальної води стрижнів обмотки статора необхідно прийняти відповідно до схеми розташування верхніх і нижніх стрижнів обмотки статора турбогенератора, як це показано на рис. 3. Кожне наступне вимірювання робиться в такій ж самій послідовності операцій на всіх гідравлічних гілках стрижнів обмотки статора турбогенератора.

Вимоги щодо врахування перепаду по висоті місця вимірювання витрати води відносно місця вимірювання тиску води реалізуються при виконанні гідравлічних розрахунків. За результатами вимірювань оформляються гідравлічні розрахунки по швидкості потоку охолоджуючої води, тепловіддачі та інтенсивності теплообміну, а також проводиться порівняльний аналіз розрахункових параметрів і даних, отриманих експериментальним шляхом в ході проведення вимірювань витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора. Після проведення дослідно-розрахункових операцій робляться висновки про динаміку зміни стану внутрішніх поверхонь трубопроводів охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора, про технічний стан порожнистих провідників за прохідністю в стрижнях і, відповідно, оцінюється достатність теплообміну контуру охолодження по кожному стрижню обмотки статора турбогенератора.

Запропонована нормативна програма дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні зони в системі охолодження стрижнів обмотки турбогенератора, знижує ризик аварій, подовжує ресурс експлуатації турбогенераторів та підвищує загальний рівень ядерної безпеки об'єкта.

Висновки

Удосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання АЕС, зокрема стрижнів турбогенераторів, є ключовим чинником забезпечення надійності та ядерної безпеки при тривалій експлуатації енергоблоків. Для забезпечення безпеки окремого обладнання та енергоблоків АЕС в цілому запропонована методика, яка базується на контролі витрати охолоджувальної води з використанням ультразвукових вимірювань та теплотехнічного аналізу, яка дозволяє своєчасно виявляти дефекти охолодження, зниження тепловіддачі та інші критичні відхилення. Визначено діапазони допустимих теплотехнічних параметрів стрижнів обмотки, що забезпечує можливість об'єктивної оцінки їх технічного стану. Це створює підґрунтя для

впровадження профілактичних заходів і корегувальних дій у межах планово-попереджувального обслуговування, а також удосконалення графіків технічного обслуговування та оптимізації експлуатаційної стратегії турбогенераторів. Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції запропонованої методики в системи управління ресурсом обладнання (PLiM) в рамках комплексної програми технічної діагностики при прийнятті рішень щодо подальшої роботи енергоблоку у позапроектні терміни, та дає змогу перейти від реактивного до превентивного технічного обслуговування і підвищити загальну ефективність експлуатації турбогенераторів в умовах сучасних вимог ядерної безпеки.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

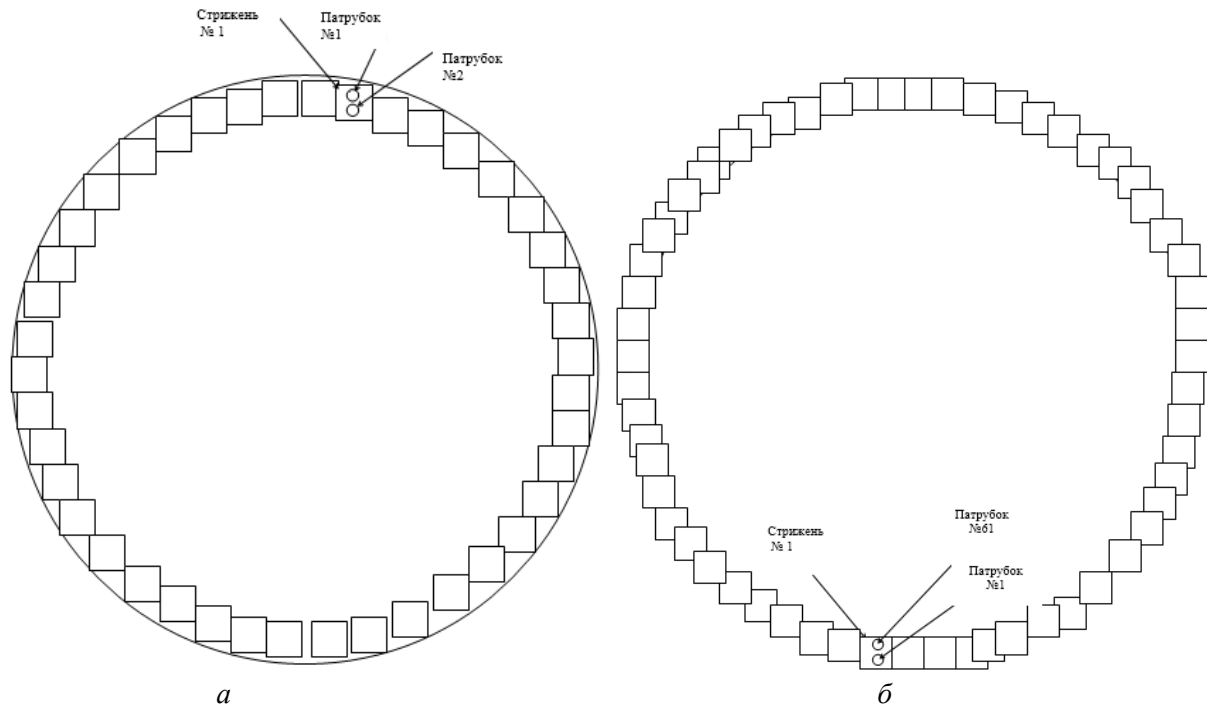


Рис. 3– Схема розташування верхніх і нижніх стрижнів обмотки статора турбогенератора:

а - Кількість стрижнів – 42, 1 – верхній патрубок, 2- нижній патрубок

б - Кількість стрижнів – 60, 1 – верхній патрубок, 61- нижній патрубок

Fig. 3 – Layout of the upper and lower rods of the stator winding of the turbogenerator:

a - Number of rods - 42, 1 - upper branch pipe, 2 - lower branch pipe

б - Number of rods - 60, 1 - upper branch pipe, 61 - lower branch pipe

Список використаних джерел:

1. (2024). Sustainable energy safety management utilizing an industry-relative assessment of enterprise equipment technical condition / Hrinchenko H., Prokopenko O., Shmygol N., Koval V., Filipishyna L., Palii S., Cioca L.-I. // Sustainability. – 2024. – № 16(2). – P. 771. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16020771>
2. An approach to ensure operational safety for renewable energy equipment / Hrinchenko H., Kupriyanov O., Khomenko V., Khomenko S., Kniazieva V. // Circular economy for renewable energy / eds. V. Koval, P. Olczak. – Springer, 2023. – Pp. 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
3. Approaches to sustainable energy management in ensuring safety of power equipment operation / Hrinchenko H., Koval V., Shmygol N., Sydorov O., Tsimoshynska O., Matuszewska D. // Energies. – 2023. – № 16(18). – 6488. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186488>
4. Zou Z. Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation in inverter-fed machines: A review / Zou Z., Liu S., Kang J. // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – № 15(10). – P. 444. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>
5. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: Європейський Зелений Курс / Г. С. Грінченко, О. А. Ковтун, В. В. Миколайко, Р. О. Нестеренко, Н. С. Антоненко // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 30. – С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72>
6. Engineering management of energy utilities for sustainable development / Hrinchenko H., Antonenko N., Tarasov I., Trokhymenko G., Magas N., Sarzhynskyi S. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – № 1429(1). – 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012017>

7. Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management / Hrinchenko H., Udovychenko V., Generalov O., Parfentieva O., Neskhodovskyi I., Kopacz M. // *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. – 2024. – № 27(3). – Pp. 109–132. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/190811>
8. Study on the thermal field of a hydro-generator under the effect of a plateau climate / Shan R., Duan J., Zeng Y., Qian J., Dong G., Zhu M., Zhao J. // *Energies*. – 2024. – № 17(4). – P. 932. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17040932>
9. Research on stator main insulation temperature field of air-cooled turbo-generator after main insulation shelling / Li W., Li Y., Su Y., Wang P., Liu W. // *Energies*. – 2018. – № 11(5). – P. 1101. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051101>
10. Loss and thermal analysis of a high-power-density permanent magnet starter/generator / Ren X., Chen Z., Du R., Feng M. // *Energies*. – 2024. – № 17(20). – P. 5049. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17205049>
11. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств / Г. С. Грінченко та інші // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2024. – Вип. 34. – С. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02>
12. Дослідження вимог міжнародних стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки / Б. Ю. Вінтенко та інші // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2023. – № 3(73). DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155>
13. Maintenance, testing, surveillance and inspection in nuclear power plants (IAEA Safety Standards Series No. SSG-74) / International Atomic Energy Agency. – 2022. – Access mode : <https://www.iaea.org/publications/14905/maintenance-testing-surveillance-and-inspection-in-nuclear-power-plants> (Last accessed November 4, 2025)
14. IEEE guide for failure investigation, documentation, analysis, and reporting for power transformers and shunt reactors (IEEE Std C57.125-2015). DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.8741317>
15. IEEE standard test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid-immersed distribution and power transformers – Redline (IEEE Std C57.100-2011). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6172694>
16. From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry / M. Moleda et al // *Sensors*. – 2023. – № 23(13). – 5970. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- Predictive maintenance system for high-end equipment in nuclear power plant under limited degradation knowledge / X. Liu et al // *Advanced Engineering Informatics* – 2024. – № 61. – 102506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102506>

Отримано: 25.08.2025

Прийнято: 04.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

¹OVCHAROV O.,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0764-4063>

¹KOTELEVETS K.,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: kvyrylo.ktl@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8811-8848>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

IMPROVEMENT OF REGULATORY APPROACHES TO TECHNICAL DIAGNOSTICS OF NPP POWER EQUIPMENT

Abstract. The article discusses the problem of improving regulatory approaches to technical diagnostics of power equipment at nuclear power plants, in particular the stator winding rods of TVV-1000 type turbogenerators. The relevance of the topic is due to the need to improve reliability and safety in conditions of beyond-design-basis operation of power units and the development of appropriate regulatory programmes for technical diagnostics. Based on a review of current international and domestic standards and an analysis of the latest methods of thermal and non-invasive diagnostics, the paper proposes a step-by-step regulatory programme for diagnosing cooling water consumption in the cooling system of turbogenerator stator cores, based on the use of an ultrasonic flow meter and thermal analysis algorithms. Criteria for assessing the technical condition of the bars are defined and appropriate corrective actions are proposed when deviations are detected during preventive maintenance work for power units of nuclear power plants. The results obtained can be integrated into PLiM turbine generator resource management systems.

KEYWORDS: *turbogenerator, rods, thermal conductivity, standardized recommendations, technical diagnostics.*

In cites: Ovcharov O., Kotelevets K. (2025), improvement of regulatory approaches to technical diagnostics of NPP power equipment. *Engineering*, (36), 119-128. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Hrinchenko, H, Prokopenko, O, Shmygol, N, Koval, V, Filipishyna, L, Palii, S & Cioca, L-I 2024, 'Sustainable energy safety management utilizing an industry-relative assessment of enterprise equipment technical condition', *Sustainability*, no 16(2), P. 771. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16020771> (in Ukraine)
2. Hrinchenko, H, Kupriyanov, O, Khomenko, V, Khomenko, S & Kniazieva, V 2023, 'An approach to ensure operational safety for renewable energy equipment', In V. Koval & P. Olczak (Eds.), *Circular economy for renewable energy*, Springer, Pp. 1-17 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1 (in Ukraine)
3. Hrinchenko, H, Koval, V, Shmygol, N, Sydorov, O, Tsimoshynska, O & Matuszewska, D 2023, 'Approaches to sustainable energy management in ensuring safety of power equipment operation', *Energies*, no 16(18), P. 6488. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186488> (in Ukraine)
4. Zou, Z, Liu, S & Kang, J 2024, 'Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation in inverter-fed machines: A review', *World Electric Vehicle Journal*, no 15(10), P. 444. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj15100444>
5. Hrinchenko, HS, Kovtun, OA, Mykolaiko, VV, Nesterenko, RO & Antonenko, NS 2022, 'Zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky AES u ponadproiektnyi termin v konteksti perekhodu do tsyrkuliarnoi ekonomiky: Yevropeyskyi Zelenyi Kurs' [Ensuring operational safety of NNP beyond the design life in the context of the transition to a circular economy: the European Green Deal.], *Mashynobuduvannia*, iss. 30, Pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72> (in Ukraine)
6. Hrinchenko, H, Antonenko, N, Tarasov, I, Trokhymenko, G, Magas, N & Sarzhynskyi, S 2024, 'Engineering management of energy utilities for sustainable development', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, no 1429(1), 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012017> (in Ukraine)

7. Hrinchenko, H, Udovychenko, V, Generalov, O, Parfentieva, O, Neskhdovskyi, I, & Kopacz, M 2024, 'Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management', *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, no 27(3), Pp. 109–132. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/190811> (in Ukraine)
8. Shan, R, Duan, J, Zeng, Y, Qian, J, Dong, G, Zhu, M & Zhao, J 2024, 'Study on the thermal field of a hydro-generator under the effect of a plateau climate', *Energies*, no 17(4), P. 932. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17040932>
9. Li, W, Li, Y, Su, Y, Wang, P & Liu, W 2018, 'Research on stator main insulation temperature field of air-cooled turbo-generator after main insulation shelling', *Energies*, no 11(5), P. 1101. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051101>
10. Ren, X, Chen, Z, Du, R & Feng, M 2024, 'Loss and thermal analysis of a high-power-density permanent magnet starter/generator', *Energies*, no 17(20), P. 5049. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17205049>
11. Hrinchenko, HS, Kiporenko, OV, Nehodov, SS, Lysenko, AY, Mazorchuk, KK & Nos, RS 2024, 'Development of a regulatory approach to assessing the risks of energy enterprises', *Mashynobuduvannia*, no 34, Pp. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02> (in Ukraine)
12. Vintenko, BYu, Smirnov, OA, Kovalenko, AS, Smirnov, SA & Buravchenko, KO 2023, 'Research into the requirements of international standards IEC 60880 and IEC 62138 for the development of software for AES information and control systems important for safety', *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no 3(73). DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155> (in Ukraine)
13. International Atomic Energy Agency 2022, *Maintenance, testing, surveillance and inspection in nuclear power plants (IAEA Safety Standards Series No. SSG-74)*, viewed <<https://www.iaea.org/publications/14905/maintenance-testing-surveillance-and-inspection-in-nuclear-power-plants>>
14. IEEE 2015, *IEEE guide for failure investigation, documentation, analysis, and reporting for power transformers and shunt reactors (IEEE Std C57.125-2015)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.8741317>
15. IEEE 2012, *IEEE standard test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid-immersed distribution and power transformers – Redline (IEEE Std C57.100-2011)*, viewed <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6172694>>
16. Mołęda, M, Małysiak-Mrozek, B, Ding, W, Sunderam, V & Mrozek, D 2023, 'From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry', *Sensors*, no 23(13), P. 5970. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- Liu, X, Cheng, W, Xing, J, Chen, X, Li, L, Guan, Y, Ding, B, Nie, Z, Zhang, R & Zhi, Y 2024, 'Predictive maintenance system for high-end equipment in nuclear power plant under limited degradation knowledge', *Advanced Engineering Informatics*, no 61, 102506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102506>

Submission received: 08/25/2025 Accepted: 11/04/2025 Published: 12/30/2025