

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.139>**ВІДНОВЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД****О.Г. Кенсицький***, докт. техн. наук, **А.С. Левицький****, докт. техн. наук,**Є.О. Зайцев*****, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: kensitsky@ukr.net, zaitsev@i.ua

Розглянуто стан енергетичної системи України в результаті ракетних атак критичної інфраструктури країни. Сформульовано основні принципи відновлення й модернізації генеруючого устаткування електростанцій країни в повоєнний період. Запропоновано відновлювати генерацію на принципово новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування. Під час відновлення зруйнованих енергоблоків мають використовуватися турбогенератори з покращеними експлуатаційними характеристиками вибірково з урахуванням характеру навантаження, географічним розташуванням станції, наявності електричних зв'язків тощо. Насамперед мова йде про машини з повним повітряним охолодженням із розширеними можливостями маневреності (зокрема й асинхронізовані). Розглянуто основні переваги таких турбогенераторів і визначені елементи та вузли конструкції, технічний стан яких у цілому є визначальним фактором забезпечення їхньої надійної експлуатації. Розглянуто принципи побудови автоматизованих систем контролю стану устаткування, зокрема систем контролю стану запресування осердя статора й вологості холодоагенту в корпусі машини. Бібл. 6, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: турбогенератор, технічний стан, надійність, дефект, діагностика.

Унаслідок повномасштабного вторгнення агресора (лютий 2022 р.) і чисельних ракетних атак критичної інфраструктури (жовтень 2022 р. – березень 2023 р.) енергетична система України зазнала значних руйнувань. Разом із розподільчими мережами зруйновані та пошкоджені генеруючі потужності переважно енергоблоків теплових електростанцій. За наявною інформацією різного ступеня ушкоджень зазнали всі теплові електростанції країни, внаслідок чого деякі були зупинені. Зруйновано майже 25 % енергоблоків теплової генерації.

У повоєнний період одним із основних завдань відбудови країни має бути відновлення її Об'єднаної енергосистеми, зокрема генеруючого обладнання. Ураховуючи, що енергоблоки теплових електростанцій країни були збудовані в 60–70 роках минулого століття, і 90 % турбогенераторів на сьогодні виробили свій розрахунковий ресурс, можна зробити висновок, що відновлювати генерацію необхідно на принципово новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування.

Останнім часом у світі спостерігається тенденція зниження попиту на турбогенератори одиничної потужності понад 500 МВт. Виключенням є країни, що розвиваються, у яких будуються енергоблоки атомних електростанцій потужністю 600–1200 МВт. Накопичений у світі досвід проектування турбогенераторів великої потужності створив передумови для удосконалення конструкції машин із повітряним і повітряно-водяним охолодженням у діапазоні потужностей до 300 МВт за 3000 об./хв. [1, 2] (до цього часу цей діапазон охоплював потужності лише до 100 МВт). Це стало можливим завдяки застосуванню ефективних схем безпосереднього охолодження, термореактивної корпусної ізоляції обмотки статора з підвищеною механічною й електричною міцністю, нових видів ізоляції ротора, електротехнічної сталі із

зменшеними питомими втратами, сучасних конструктивних матеріалів. Прикладами таких розробок є турбогенератори потужністю 500 МВА, 50 Гц із повітряним охолодженням фірми *Alstom Power* і потужністю 620 МВА, 50 Гц фірми *Toshiba* [3, 4].

Подальше підвищення одиничної потужності машин із повітряним охолодженням обмежується нагрівом обмоток, водночас деякого підвищення потужності на 20–25 % у тих же габаритах можна досягти завдяки підвищенню тиску та швидкості циркуляції повітря в корпусі генератора.

Парк турбогенераторів теплових електростанцій в Україні переважно складається з машин потужністю 200 та 300 МВт (75 % загальної кількості). І під час відновлення зруйнованих енергоблоків мають використовуватися турбогенератори з покращеними експлуатаційними характеристиками вибірково з урахуванням характеру навантаження, географічним розташуванням станції, наявності електричних зв'язків тощо. Насамперед мова йде про машини з повним повітряним охолодженням із розширеними можливостями маневреності (зокрема й асинхронізовані).

На АТ «Українські енергетичні машини» розроблена серія турбогенераторів ТА з повітряним охолодженням одиничною потужністю від 150 до 400 МВА. Турбогенератори з повним повітряним охолодженням мають низку переваг порівняно з машинами з водневим та воднево-водяним охолодженням, які визначають технічну та економічну доцільність використання в енергоустановках із підвищеними вимогами щодо надійності та екологічної сумісності, розширення діапазону припустимих навантажень, зниження експлуатаційних витрат тощо.

Головними з них є:

- підвищений коефіцієнт готовності 0,997–0,998 порівняно з 0,95–0,995 у турбогенераторів із безпосереднім рідинним та водневим охолодженням;
- спрощені умови експлуатації та ремонту, що скорочують терміни та вартість ремонтних робіт;
- підвищений рівень вибухо- та пожежобезпеки;
- простота конструкції, що обумовлює скорочення терміну проектування та виготовлення головних зразків;
- полегшення процедури контролю й діагностики технічного стану турбогенератора;
- відсутність допоміжних систем рідинного охолодження обмотки та водневого охолодження осердя статора, а також маслозабезпечення ущільнень вала тощо.

Окремим завданням під час відновлення генерації є створення турбогенераторів із розширеними маневреними характеристиками, зокрема за реактивною потужністю. Безперечно, тут має бути використаний досвід українських електромашинобудівників зі створення перших у світі асинхронізованих турбогенераторів. Українськими електромашинобудівниками створена серія турбогенераторів ТАП з повним повітряним охолодженням поздовжньо-поперечного збудження.

Основною перевагою таких машин, на додаток до наведених вище, є розширений діапазон регулювання за реактивною потужністю. На рис. 1 наведена діаграма припустимих навантажень турбогенератора ТАП-220-2, спроектованого на заміну турбогенераторів ТВВ-220-2А енергоблоків № 1 і № 2 Рівненської АЕС.

Як видно з рисунку, діапазон регулювання реактивної потужності турбогенератора ТАП-220-2 охоплює від +200 до -250 Мвар. Тут же для наочності пунктирною лінією наведено обмеження в зоні споживання реактивної потужності для турбогенератора ТВВ-220-2А, що сьогодні знаходяться в експлуатації. Тобто, споживання реактивної потужності турбогенератором ТАП-220-2 у режимі глибокого недозбудження вдвічі перевищує аналогічний показник турбогенератора ТВВ-220-2А.

У таблиці для порівняння наведено технічні параметри обох турбогенераторів.

Під час впровадження в експлуатацію нових типів турбогенераторів додаткова увага має бути приділена таким негативним явищам, що є характерними для цих машин:

- розпушування й перегріву пакетів у торцевій зоні осердя статора;
- послаблення пресування, стирання ізоляції обмотки й сегментів центральної зони осердя статора;

- послаблення кріплення стержнів у пазовій і лобовій частинах, підвищені вібрації голівок лобових частин обмотки статора;
- перегріву, ушкодження ізоляції, деформація витків обмотки ротора та інше.

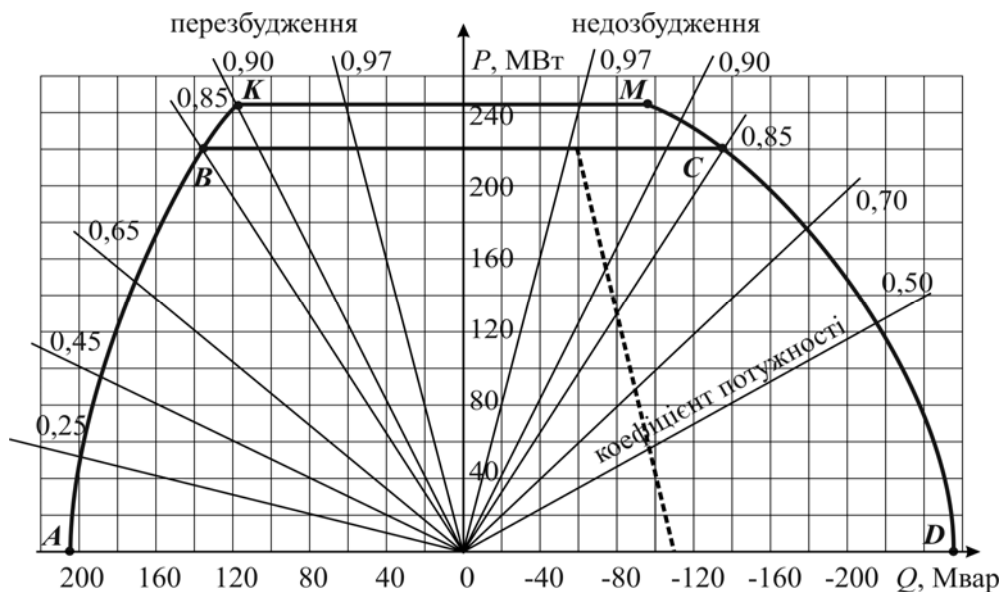


Рис. 1

№ п/п	Параметри	Тип турбогенератора	
		ТАП-220-2	ТВВ-220-2АУ3
1	Повна номінальна потужність, МВА	259	259
2	Номінальна напруга статора, кВ	15,75	15,75
3	Номінальна потужність, МВт	220	220
4	Номінальний Cos φ	0,85	0,85
5	Номінальний струм статора, А	9487	9487
6	ККД, %	98,7	98,6
7	Лінійне навантаження статора, А/см	1116	1495
8	Кількість обмоток збудження	2	1
9	Охолодження:		
	обмотка статора	опосередковане повітрям	безпосереднє дистиллятом
	осердя статора	безпосереднє повітрям	безпосереднє воднем
	обмотка ротора	безпосереднє повітрям	безпосереднє воднем
	Тиск холодоагента в корпусі, МПа	0,1	0,3
11	Маса ротора, т	65,0	41,8
12	Маса загальна, т	299	269
13	Коефіцієнт готовності, %	99,85	99,50

Особливого значення для турбогенераторів із повітряним охолодженням набуває стан запресування осердя статора, оскільки відведення теплових втрат здійснюється через його радіальні вентиляційні канали. Тепловіддача з поверхонь вентиляційних каналів у повітрі суттєво менша порівняно з водневим заповненням корпусу машини. У таких умовах суттєвого значення набуває кондуктивна тепла провідність пакетів в осьовому напрямку, поперек листів сталі, яка переважно визначається зусиллям їхнього запресування.

Отже, турбогенератори з повним повітряним охолодженням мають бути оснащені автоматизованими системами безперервного контролю стану запресування осердя статора

Як відомо, стан пружного стиснення осердя статора потужного турбогенератора забезпечується його пресуванням під час виготовлення [3–6]. У подальшому в процесі експлуатації виникає зниження зусиль, що стискають осердя, що призводить до втрати запасу пружності та є потенційною причиною небезпечних ушкоджень осердя. Виникає відносне зміщення листів активної сталі, стирання ізоляції між листами, розпушення зубців крайніх пакетів, викришування фрагментів листів, місцеве замикання листів та нагрівання пакетів. Зниження тиску спресованості в осерді, яке здебільшого починається в торцевих зонах зубців, за несприятливих умов може поширитись на інші зони осердя. Досить небезпечним розвитком цього процесу є збільшення нагрітої дефектної зони в осерді й перехід до лавиноподібного росту нагрівання окремих осередків зони осердя, аж до виплавлення сталі – так званої «пожежі заліза» – з ушкодженням корпусної ізоляції стрижнів обмотки. Схему розвитку дефекту осердя, пов'язаного з послабленням пресування, показано на рис. 2. Основними причинами ослаблення щільності спресованості активної сталі осердя є: усування та стирання ізоляційного лакового покриття листів електротехнічної сталі; підвищене нагрівання крайніх пакетів у разі тривалої роботи генераторів із коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці; нерівномірність нагрівання в радіальному напрямку; зміна температури під час коливальних навантажень; термомеханічні деформації в статорах; пружнов'язкий плин ізоляційного лакового покриття. У деяких випадках ослаблення може бути наслідком недостатньої щільності пресування на заводі-виготовлювачі.

Визначення дефектів стану спресованості осердя та їхнього усунення як на етапі виготовлення, так і під час експлуатації на ранніх етапах їхнього зародження, а також своєчасне прийняття правильних рішень щодо їхньої ліквідації до виникнення аварійної ситуації забезпечують високий коефіцієнт готовності, зумовлюють скорочення часу простою машини, дають змогу зменшити витрати на ремонти.

Визначення дефектів та оцінку технічного стану можна здійснити тільки з використанням систем контролю та технічної діагностики, до складу яких зазвичай входять: комплекс контрольованих параметрів, комплекс методів контролю цих параметрів та комплекс

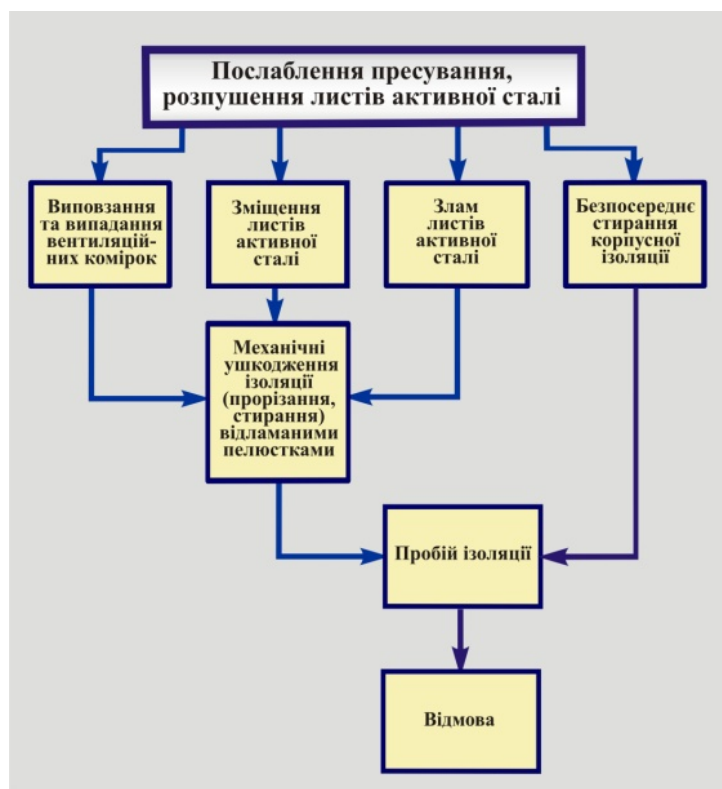


Рис. 2

інформаційно-вимірювальних засобів для реалізації цих методів. Усі ці елементи взаємопов'язані, і недоліки кожного з них знижують загальну ефективність діагностування електрообладнання. Підґрунтям для отримання контрольної-діагностичної інформації є первинні джерела інформації (сенсори та методи попередньої обробки інформації) інформаційно-вимірювальних засобів, які мають відповідати певним, досить жорстким вимогам, що враховують особливості не лише конструкції ТГ, а й робочого середовища об'єкту діагностування.

Основні методи, які нині застосовуються, або можуть бути застосованими для контролю запресування осердя, показано на рис. 3 [6].

Під час створення нового типу потужного турбогенератора для розроблення його системи контролю та діагностики та її компонентів необхідно досконало знати особливості конструкції машини та особливості режимів роботи.

Окрім того, в експлуатації залишаються багато турбогенераторів із рідинним охолодженням обмотки статора, зокрема надвисокої потужності в 1000 МВт, які навряд чи будуть замінюватися найближчим часом. Для таких машин актуальним є стан системи забезпечення обмотки статора дистиллятом, а саме її щільності. Будь-які течі в стрижнях і з'єднаннях у корпусі турбогенератора призводять до підвищення вологості холодоагента (водню), що може бути визначено на більш ранніх стадіях розвитку дефекту, поки він не призвів до руйнувань обмотки (пробій ізоляції). Власне, інтенсивне забруднення холодоагента (водню) вологою з домішками кисню та турбінного масла є однією з основних причин зупинок та руйнувань потужних турбогенераторів, синхронних компенсаторів та електричних машин великої потужності, які охолоджувались воднем. Методи та прилади контролю якості водню, які використовуються на діючих електростанціях, залишаються ще недосконалими. Зараз на вітчизняних електростанціях вимірювання точки роси в генераторах згідно з вимогами «Правил технічної експлуатації електричних станцій та мереж» (ПТЕ) виконується персоналом електростанцій лише раз на тиждень. У 2002 році ПТЕ було переглянуто, але без урахування того, що кількість аварій через підвищений вміст вологості та інших домішок у холодоагенті (водні) збільшилась. У зв'язку з цим розробка та вдосконалення приладів та методів для автоматизованого контролю вологості холодоагента (водню) є одним із пріоритетних напрямів удосконалення систем моніторингу технічного стану турбогенераторів.

Висновки. 1. Відновлювати генерацію енергосистеми країни необхідно на принципово новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування. Під час відновлення зруйнованих енергоблоків мають використовуватися турбогенератори з покращеними експлуатаційними характеристиками вибірково з урахуванням характеру навантаження, географічним розташуванням станції, наявності електричних зв'язків тощо. Насамперед йдеться про машини з повним повітряним охолодженням із розширеними можливостями маневреності (зокрема й асинхронізовані).

2. Відновлення й модернізація устаткування має проводитися із застосуванням автоматизованих систем безперервного контролю стану запресування осердя статора та вологості холодоагента в корпусі турбогенератора.



Рис. 3

1. Air Cooled Turbogenerators. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/AnsaldoEnergia-AirCooledturbogenerators-20220731.pdf> (дата звернення: 06.05.2023)
2. Siemens Air-Cooled Generators SGen-100A-2P Series. URL: https://linquipequipment.s3.us-west-2.amazonaws.com/12/equipment_12_catalog_ca968fc99f985107d62053fb0721c7b71f38faf1.pdf (дата звернення: 06.05.2023)
3. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М. та ін. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
4. Кенсицкий О.Г., Ключников А.А., Федоренко Г.М. Безопасность, надежность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС. Чернобыль (Киев. обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС, 2009. 240 с.
5. Левицький А.С., Федоренко Г. М., Грубой О. П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Київ: Ін-т електродинаміки НАН

України, 2011. 242 с.

6. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кобзар К. О., Тітко В.О. Методи та засоби контролю стану спресованості осердя статора потужних турбогенераторів. Київ: "Наукова думка". 2023. 140 с. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1846-4>.

RECONSTRUCTION AND MODERNISATION UKRAINE POWER-STATIONS TURBOGENERATORS IN POST-WAR PERIOD

O.H. Kensytskyi, A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: kensitsky@ukr.net, zaitsev@i.ua

In this paper, current state energy equipment of IPS Ukraine after missile attacks on the country's critical infrastructure is considered. The main principles for generating equipment reconstruction and modernization of the Ukraine power plants in the post-war period formulated. To restore generation equipment should be at fundamentally new level with the involvement of advanced achievements of global and internal electrical engineering is proposed. During the reconstruction of destroyed power units, it is necessary to use turbine generators with colored operational characteristics that take into account the nature of the machine load, the geographical location of the station, the presence of electrical connections, etc. Foremost (first priority) it is necessary to restore machines with full air-cooling, which have enhanced maneuverability (including asynchronous). The main advantages of turbogenerators with air-cooling are considered. Identified elements and components of the structure, the technical condition of which as a whole is a determining factor for ensuring their reliable operation. The principles of building automated systems for monitoring the state of the equipment (systems for monitoring the state of pressing the stator core and humidity of the refrigerant in the machine body) are considered. Ref. 6, fig. 3, table.

Keywords: turbogenerator, technical state, reliability, defect, diagnostics.

1. Air Cooled Turbogenerators. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/AnsaldoEnergia-AirCooledturbogenerators-20220731.pdf> (Accessed: 06.05.2023)
2. Siemens Air-Cooled Generators SGen-100A-2P Series. URL: https://linquipequipment.s3.us-west-2.amazonaws.com/12/equipment_12_catalog_ca968fc99f985107d62053fb0721c7b71f38faf1.pdf (Accessed: 06.05.2023)
3. Zozulin Y.V., Antonov O.Y., Bychik V.M., Borychevskiy A.M. and al. Creation of new types and modernisation of operating turbogenerators for thermal electric stations. Kharkiv: PF «Kolehium», 2011. 228 p. (Ukr)
4. Kensytskyi O.H., Kliuchnykov A.A., Fedorenko G.M. Safety, reliability and efficiency of exploitation of electrical engineering and electroenergy equipment of blocks NPP. Chernobyl (Kyev. obl.): Institute for Safety Problems of NPP, 2009. 240 p. (Rus)
5. Levytskyi A.S., Fedorenko G. M., Hruboi O. P. Control of the state of powerful hydro- and turbogenerators is by means of capacity measuring devices of mechanical defects parameters. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 242 p. (Ukr)
6. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O., Titko V.O. Methods and controls of the pressing powerful turbogenerators stator core state. Kyiv: «Naukova dumka». 2023. 140 с. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1846-4>. (Ukr)

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 22.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 22.06.2023