

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.031>

ВПЛИВ СТУПЕНЯ ЗАКРІПЛЕННЯ ОБМОТКИ В ТОРЦІ ПАЗА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІЗОЛЯЦІЇ ЇЇ СТЕРЖНЯ

К.А. Кучинський, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

На основі методу скінченних елементів запропоновано чисельну методику розрахунку термомеханічних переміщень і напружень вузлів стержня обмотки статора потужного турбогенератора з урахуванням його режими і конструктивних факторів. Наведено результати досліджень цих характеристик в ізоляції вздовж довжини стержня в радіальному та аксіальному напрямках за різних варіантів закріплення обмотки у торцевій зоні осердя. Визначено закономірності розподілу максимальних і середніх значень термомеханічних параметрів у назвоїй і лобовій частинах за умов традиційного способу кріплення та за наявності вільної ділянки стержня в торцевій зоні статора у номінальному режимі роботи генератора. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: потужний турбогенератор, осердя статора, ізоляція обмотки, варіанти закріплення, чисельні дослідження, термомеханічні параметри.

Вступ. Основним генеруючим обладнанням енергоблоків електричних станцій України є потужні синхронні турбогенератори (ТГ), які виступають найбільш складною ланкою в електричній частині. Надійність електротехнічного обладнання електростанцій є одним із основних факторів, що забезпечує безперервне вироблення електроенергії.

Атомна енергетика на сьогодні є найбільш стабільним, надійним й прогнозованим виробником електроенергії.

Більшість ТГ у світі, що експлуатуються на енергоблоках атомних електростанцій (АЕС), мають чотириполюсне виконання та одиночну потужність до 1500...1700 МВА. За даними *CIGRE*, основними виробниками таких генераторів на сьогодні є фірми *Alstom* (Франція), *Siemens* (Німеччина), *Asea Brown Boveri* (Швейцарія), *General Electric* (США). Чотириполюсні ТГ у порівнянні з двополюсними мають низку переваг.

На чотирьох АЕС України експлуатуються 15 енергоблоків загальною потужністю 13,835 ГВт, що складає приблизно 25 % загальної генерації країни. У їхньому складі перебувають 13 ТГ потужністю 1000 МВт, із яких вісім чотириполюсних (1500 об/хв) і п'ять двополюсних (3000 об/хв).

Аналіз роботи ТГ енергоблоків АЕС України свідчить про їхню незадовільну надійність, причому як двополюсних, так і чотириполюсних. З підвищенням одиничної потужності надійність знижується, частіше відбуваються відмови [1].

Значна кількість ушкоджень генераторів в експлуатації викликана дефектами ізоляції обмоток статора (ОС) та збудження (ОЗ) [2, 3], що виникають, у тому числі, внаслідок старіння ізоляції, її зволоження, а також у результаті перенапружень, механічних ушкоджень тощо.

Відмови синхронних генераторів, спричинені ушкодженням ОС, виникають удвічі частіше, ніж ті, що відбуваються через ушкодження ОЗ. Зіпсування ОС виникає внаслідок пробою ізоляції. Ділянки, що мають низьку міцність ізоляції, з'являються внаслідок подальшого розвитку дефектів у процесі експлуатації [4].

Забезпечення високого рівня експлуатаційної надійності, коефіцієнта корисної дії та ремонтпридатності ТГ на основі нових інженерних рішень є головними задачами важкого електромашинобудування. Значна кількість цих рішень спрямована на вдосконалення торцевої зони (ТЗ) статора [5–7], однієї з найважливіших проблемних зон конструкції машини, нагрів якої обмежує можливості ТГ в експлуатаційних режимах, у тому числі у режимах із

споживанням реактивної потужності [8]. Це пояснюється як складністю конструкції ТЗ, так і наявністю в цій зоні електричних, магнітних, теплових і механічних явищ, які ще недостатньо детально вивчені.

Постановка проблеми. Спосіб закріплення стержнів у пазах статора ТГ визначає ступінь впливу обмотки на стан зубців осердя в крайньому пакеті й нерівномірність розподілу тиску пресування. У випадках швидкої (до 5 років напрацювання) відмови генераторів через розкріплення стержнів у пазах основною причиною пошкодження ізоляції вважається вплив термомеханічних напружень, що виникають в ОС, жорстко пов'язаній з осердям.

Для зниження рівня цих впливів застосовуються різні конструктивні заходи. Зокрема, в моделі аксіальних термомеханічних деформацій статорів [9] з метою зменшення фрикційної взаємодії обмотки і сталі зубця в кінцевій зоні машини досліджувалися варіанти зі «звільненням» стержня на певну глибину в торці статора. На основі аналітичного рішення з використанням емпіричних коефіцієнтів, що варіюються в широких межах, в теоретичних висновках констатується, що подібні заходи дають змогу обмежити нерівномірність тиску пресування сердечника і знизити його термомеханічну складову в торцевій частині статора ТГ.

У монографії [10] аналізується одновимірний елемент статора генератора. За умови допущення в розрахунках про рівномірність нагріву всіх стержнів за аксіальною і тангенціальною координатами теоретичної моделі осердя так само розглядається можливість «звільнення» обмотки в торцевій зоні на деяку глибину для зниження фрикційної взаємодії обмотки і зубців.

Однак аналіз термомеханічних характеристик елементів статора ТГ свідчить про появу залишкової складової та зниження тиску пресування в кінцевій зоні генератора у разі значного нагрівання міді стержнів порівняно із залізом осердя і прослизанні ОС відносно його зубців [11].

У дослідженнях термомеханічних переміщень і напружень вузлів ТГ на основі одновимірних стержневих схем вибір їхніх параметрів і поєднань останніх істотно залежить від наявності експериментальних даних, які практично неможливо отримати в реальних умовах на електростанціях.

Можливість розвитку таких досліджень у напрямі просторового їхнього вивчення з урахуванням різних механічних і режимних факторів дає можливість використання чисельного підходу до вирішення завдання, зокрема, на основі методу скінченних елементів (МСЕ) [2].

Переваги МСЕ порівняно із скінченно-різницевиими методами полягають у можливості вільного варіювання параметрами сітки для розрахунку напруженого стану різних тіл, легкості врахування граничних умов, наявності сформованих для вирішення задачі розріджених структур матриць у рівняннях термомеханіки.

Метою пропонованої статті є визначення основних закономірностей розподілу переміщень і напружень елементів обмотки статора та кількісних співвідношень аксіальних і радіальних складових термомеханічних характеристик у номінальному режимі турбогенератора з урахуванням різних умов кріплення пазової частини стержня в кінцевій зоні осердя.

Математична модель для дослідження термомеханічних характеристик елементів стержня обмотки статора турбогенератора. Для знаходження термомеханічних переміщень у вузлах i, j, m скінченного (трикутного) елемента (невідомі U з індексами «2-1» – вздовж вісі x ; з індексами «2» – вздовж вісі у декартовій системі координат) з урахуванням початкових і граничних умов вирішується таке матричне рівняння:

$$[k] \cdot [U_{2i-1} \ U_{2i} \ U_{2j-1} \ U_{2j} \ U_{2m-1} \ U_{2m}]^T = \{f\}, \quad (1)$$

де $\{f\}$ – вектор його теплового навантаження; $[k]$ – матриця жорсткості трикутного елемента, яка має вигляд

$$[k] = [B]^T [D][B]tS, \quad (2)$$

де позначено: $[B]$ і $[B]^T$ – відповідно матриця градієнтів, що зв'язує деформації елемента і переміщення його вузлів, і транспонована матриця; $[D]$ – матриця пружних констант; t – товщина елемента; S – його площа.

$$[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу елемента.

Вектор навантаження елемента позначено як

$$\{f\} = [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} S = \frac{\alpha E t \Delta T}{2(1-\mu)} \begin{Bmatrix} b_i \\ c_i \\ b_j \\ c_j \\ b_m \\ c_m \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

де $b_i, b_j, b_m, c_i, c_j, c_m$ – коефіцієнти матриці, що залежать від координат вершин елемента; $\{\varepsilon_0\}$ – початкова деформація елемента, що має вигляд

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення; ΔT – відхилення температури від деякого рівноважного значення.

Далі розраховуються деформації елемента з використанням вже відомих переміщень U у вузлах:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Термомеханічні напруження в елементах визначаються через вузлові переміщення:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{U\} - [D]\{\varepsilon_0\}. \quad (7)$$

Теоретичні положення для чисельного розрахунку термомеханічних характеристик реалізовані у вигляді пакету комп'ютерних програм.

Практичний інтерес становить оцінка величин переміщень і термомеханічних напружень в елементах стержня на виході обмотки із крайнього пакета осердя в ТЗ статора (рис. 1) генератора.

Аналіз результатів досліджень. Проаналізуємо отримані результати чисельних розрахункових досліджень впливу ступеня закріплення стержня в ТЗ осердя на термомеханічні характеристики ізоляції статорної обмотки чотириполюсного ТГ потужністю 1000 МВт у режимі номінального навантаження.

Конструктивно кріплення обмотки розробляється з метою максимально можливого виключення радіальних і тангенціальних переміщень у лобових частинах. Одночасно воно має забезпечувати вільні аксіальні переміщення у разі нагрівання пазової частини ОС [12].

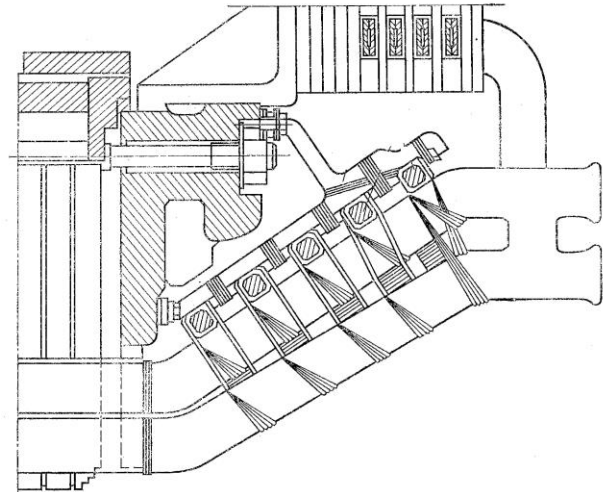


Рис. 1



Рис. 2

Таким чином, для коректного вирішення задачі визначаються і задаються граничні умови на половині стержня (розрахункової області – рис. 2) в пазовій і лобовій частинах обмотки машини в найбільш нагрітій її частині – з боку турбіни.

Приймалося, що аксіальні переміщення на лівій вертикальній границі (вісі симетрії моделі – середині стержня в активній зоні статора) відсутні. На дні паза та на границі між стержнями ОС (верхня й нижня горизонтальні лінії до першої вертикальної) радіальні переміщення всіх вузлів моделі також дорівнюють нулю. Тут можливі переміщення тільки вздовж вісі x . Попередньо проводився чисельний термомеханічний розрахунок половини осердя статора (від середини до торцевої зони з боку турбіни) в аксіальному перетині. Отримані величини складових переміщень вузлів статора вздовж вісі x задавалися як граничні умови I роду у вузли моделі стержня, у яких «здійснювалося» кріплення лобових частин (від вертикальної лінії в місці початку кріплень до голівок лобових частин).

Для термомеханічних досліджень «вивільнена» ділянка стержня на виході з крайнього пакету статора складала у варіантних комп'ютерних розрахунках 20 см. На рис. 3 і 4 наведено результати чисельних досліджень МСЕ відповідно термомеханічних переміщень і напружень в ізоляції за довжиною стержня статорної обмотки ТГ у разі номінального навантаження за різних умов її закріплення в зоні крайніх пакетів осердя: 1, 3 – аксіальні (вздовж вісі x моделі) при традиційному закріпленні та наявності вільної ділянки довжиною 20 см у пазовій зоні; 2, 4 – радіальні (вздовж вісі y) за тих самих умов.

Як видно з графіків, максимальні значення термомеханічних переміщень і напружень в елементах стержня обмотки спостерігаються в ТЗ генератора.

Водночас максимальні аксіальні переміщення вузлів ізоляції стержня на ділянці від крайнього пакета до вузла початку кріплення лобових частин обмотки у разі «вивільнення» її пазової частини в кінцевій зоні збільшуються в 1,11 раза щодо звичайного закріплення (від 0,619 до 0,689 мм). Значно більшою мірою зростають значення максимальних радіальних переміщень (відповідно від -0,181 до -0,336 мм, тобто в 1,86 раза).

Величини напружень (рис. 4) у пазовій зоні в обох випадках монотонно збільшуються від середньої частини осердя статора до його торця, що пов'язано з підігрівом холодоагенту за довжиною стержня. У той же час вздовж вісі x вони значно менше, ніж вздовж вісі y , що пояснюється, з одного боку, припущенням вільного аксіального переміщення стержнів, з іншого – конструктивними обмеженнями радіальних переміщень («зверху» – за рахунок клину, «знизу» – прокладки і нижнього стержня, а також за рахунок бічного тертя об стінки паза).

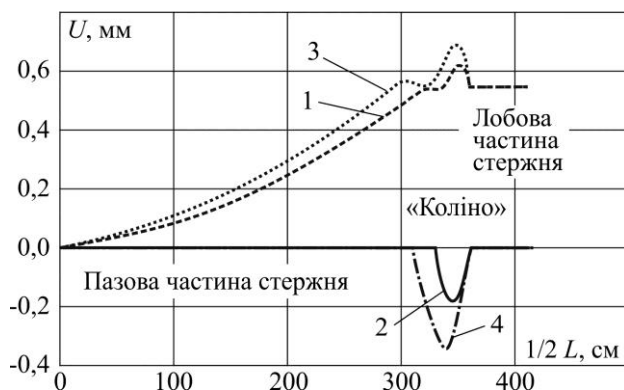


Рис. 3



Рис. 4

За наявності «вільної» ділянки термомеханічні напруження в ізоляції пазової частини обмотки зменшуються за абсолютною величиною несуттєво (приблизно на 1,5...3 %). Зміна напружень у зоні вильоту лобової частини носить нелінійний характер, що обумовлено відповідними початковими і граничними умовами в досліджуваній області й рівнями нагрівів сталі зубця, міді стержня та його ізоляції.

На виході з пазу зниження максимальних значень аксіальних і радіальних напружень стиску незначне – відповідно на 4,1 % (з -63,955 до -61,432 МПа) і на 8,6 % (від -129,430 до -119,221 МПа).

Як і слід було очікувати, у «вільній» зоні деформованого стержня величини термомеханічних напружень в обох випадках несуттєві й залежать від геометрії «коліна».

У місці початку закріплення лобових частин ОС аксіальні та радіальні напруження в даних вузлах ізоляції за наявності «вільної» ділянки стержня в торці пазової частини значно підвищуються – від -67,376 до -102,742 МПа (або на 52,5 %) і відповідно від -91,562 до -113,013 МПа (на 23,4 %).

Таким чином, за різних варіантів кріплення обмотки в пазу значення термомеханічних напружень в ізоляції стержня в аксіальному напрямку значно менше межі її міцності (70...80 МПа), а в радіальному – близькі до величини розривної міцності. Особливу небезпеку становлять максимальні величини локальних радіальних та аксіальних напружень у вузлах, що розташовані на виході стержня в ТЗ статора, в якій в окремих елементах ізоляції вони істотно перевищують допустимі значення за механічною міцністю матеріалу ізоляції.

Висновки. Найбільші значення термомеханічних переміщень і напружень в елементах ізоляції стержня за обох варіантів пазового кріплення обмотки спостерігаються у торцевій зоні ТГ.

У випадку «вивільнення» пазової частини обмотки в кінцевій зоні осердя значно, на 86 %, збільшуються радіальні переміщення на виході з паза, що може призвести до небезпечної деформації на вигин стержня. Водночас, що особливо важливо, термомеханічні напруження в ізоляції уздовж всієї пазової частини обмотки зменшуються несуттєво, приблизно на 1,5...3 %, а максимальні значення на виході з паза зміщаються вглиб осердя та знижуються лише від 4,1 до 8,6 %. У місці початку закріплення лобових частин аксіальні й радіальні напруження в даних вузлах ізоляції обмотки статора підвищуються значно – відповідно на 52,5 і 23,4 %, що може негативно впливати як на механічний стан матеріалу, так і сприяти погіршенню вібраційного стану стержня з ослабленням його кріплення.

Роботу виконано частково за держбюджетною темою «Розвиток наукових засад та розробка методів і систем діагностування електричних машин з блоком прогнозування їх залишкового ресурсу» (Шифр «ДІАГНОСТИКА ЕМ-3»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 09.07.2019 р., протокол № 12, Державний реєстраційний номер роботи 0120U002002, частково за темою «Наукове обґрунтування та розробка методів і засобів підвищення безвідмовності потужного генеруючого обладнання ТЕС, ГЕС і АЕС» (шифр «БЕЗВИДМОВНІСТЬ-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 29.05.2018 р., протокол № 9, Державний реєстраційний номер роботи 0119U001213. КПКВК 6541030.

1. Кенсницький О.Г. Експлуатаційна надійність генеруючого обладнання енергоблоків атомних електростанцій України. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.100>
2. 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.
3. Кучинский К.А. Анализ температурного поля ротора турбогенератора мощностью 300 МВт при асимметрии охлаждения пазовой зоны. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 4. С. 59–66.
4. Голоднова О.С. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения: [учеб.-метод. пос.]. Москва: ИПК-госслужбы, 2005. 92 с.
5. Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Титко О.І., Грубой О.П., Пенський В.Ф., Мінко О.М. Статор електричної машини. Патент України № 99571, 2015.
6. Титко О.І., Кобзар К.О., Хвалін Д.І. Осердя статора електричної машини змінного струму. Патент України № 111154, 2016.

7. [Титко О.І.], Мишастий М.Д., Воронін А.І., Хвалін Д.І. Експериментальні дослідження ефективності екранів зубцево-пазової конструкції статорів турбогенераторів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 46. С. 34–42.
8. Кенсидький О.Г., Хвалін 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>
9. Аврух В.Ю., Пикульский В.А., Чистиков А.А. Исследование возможностей снижения термомеханических нагрузок в статорах турбогенераторов. *Электрические станции*. 1986. № 4. С. 42–44.
10. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій: Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
11. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Электросила*. 2004. № 43. С. 56–64.
12. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. Ленинград: Наука, 1986. 184 с.

INFLUENCE OF THE DEGREE OF FIXING THE WINDING AT THE END OF THE SLOT OF THE TURBOGENERATOR STATOR ON THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ITS CORE ISOLATION

К.А. Kuchynskyy

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Based on the finite element method, a numerical method for calculating thermomechanical movements and stresses of the components of the stator winding of a powerful turbogenerator is proposed, taking into account its regime and structural factors. The results of studies of these characteristics in insulation along the length of the core in radial and axial directions in different variants of fixing the winding in the end zone of the core are presented. The regularities of distribution of maximum and average values of thermomechanical parameters in the groove and frontal parts with the traditional method of fastening and the presence of a free section of the core in the end zone of the stator in the nominal mode of operation of the generator are determined. Ref. 12, fig. 4.

Keywords: powerful turbogenerator, stator core, winding insulation, mounting options, numerical studies, thermomechanical parameters.

1. Kentsytskiy O.H. Operating reliability of generating equipment of power units of nuclear power plants of Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Vol. 58. Pp. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.100> (Ukr)
2. Kuchynskyy 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)
3. Kuchynskyy K.A. The Analysis of Temperature Field of Rotor of Turbogenerator Capacity 300 MW at Asymmetry of Cooling of Grooving Zone. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 4. Pp. 59–66. (Rus)
4. Golodnova O.S. Principal causes of failures of turbogenerators and a way of their forestalling. Moskva: IPK-gossluzhby, 2005. 92 p. (Rus)
5. Kramarsky V.A., Cheremisov I.Ya., Titko O.I., Gruboy O.P., Pensky V.F, Minko O.M. Stator of an electric machine. Patent UA No 99571, 2015. (Ukr)
6. Titko O.I., Kobzar K.O., Hvalin D.I. The stator core of AC electric machine. Patent UA No 111154, 2016. (Ukr)
7. [Титко О.І.], Myshasty N.D., Voronin A.I., Hvalin D.I. Experimental studies of the effectiveness of tooth-slot design screens of turbo generators stators. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. Vol. 46. Pp. 34–42. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.46.034>
8. Kentsytskiy O.G., Hvalin D.I. The end zone turbogenerator 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>
9. Avrukh V.Yu., Pikulskiy V.A., Chistikov A.A. Research of possibilities for reducing thermomechanical loadings of stators of turbogenerators. *Elektricheskie stanzii*. 1986. No 4. Pp. 42–44 (Rus)
10. Zozlin Yu.V., Antonov O.E., Bychik V.M., Borichevskii A.M., Kobzar K.O., Livshits O.L., Rakogon V.G., Rogovyi I.Kh., Khajmovich L.L., Cherednik V.I. Creation of new types and modernization of acting turbogenerators for thermal power plants. Kharkiv: PF «Kolegium», 2011. 228 p. (Ukr)
11. Golodnova O.S., Rostik G.V. Analysis and provisions under the forestalling of faults of cores of stators of turbogenerators. *Elektrosila*. 2004. No 43. Pp. 56–64. (Rus)
12. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. Scientific of a basis of designing of turbogenerators. Leningrad: Nauka, 1986. 184 p. (Rus)