

## МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОБОВИХ ЧАСТИН ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ЇХНЬОГО КРІПЛЕННЯ В ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ОСЕРДЯ

**К.А. Кучинський\***, докт.техн.наук, **В.А. Крамарський**, канд.техн.наук, **В.О. Тітко\*\***, канд.техн.наук,  
**М.С. Гуторова\*\*\***, канд.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com)

*Досліджено чисельним методом механічні характеристики лобових частин обмотки статора турбогенератора потужністю 300 МВт за різних варіантів кріплення стержня у торцевій частині статора у разі номінального навантаження. Отримано розподіл радіальних і аксіальних механічних переміщень та напружень вузлів ізоляції вздовж лобової частини стержня обмотки під дією електродинамічних зусиль. Проведено оцінку змін вказаних характеристик у разі ослаблення кріплення стержнів у торцевій частині статора. Для зменшення переміщень лобової частини обмотки запропоновано нову вдосконалену конструкцію її кріплення на виході з осердя. Бібл. 10, рис. 3.*

**Ключові слова:** турбогенератор, торцева зона, обмотка статора, метод скінченних елементів, механічні переміщення та напруження.

**Вступ.** Наразі більшість енергетичних електромашин і, зокрема, турбогенераторів (ТГ) ТЕС і АЕС України повністю виробили свій розрахунковий ресурс. Тому однією з найважливіших проблем в енергетиці є необхідність подовження надійної та ефективної експлуатації ТГ понад терміни, встановлені відповідними інструкціями і стандартами. Аналіз інформації про відмови вузлів ТГ потужністю 160–320 МВт [1–4] показує, що основними їхніми причинами є ушкодження активної сталі та обмоток статора внаслідок місцевого перегрівання, ослаблення пресування активної сталі [5], кріплення пазових клинів і лобових частин обмотки та ін. Це стосується і генераторів АЕС потужністю 1000 МВт, де є проблеми з лобовими частинами обмотки статора.

Підвищена вібрація залишається однією з головних причин деградації та пошкоджень ТГ, про що свідчать багаторічні дані ремонтів і розслідування аварійних зупинок, які сталися останнім часом на ТЕС і АЕС України. Постійно фіксуються випадки ослаблення закріплення крайніх пазових клинів і навіть їхнє випадіння під час роботи машини. Необхідність вдосконалення кріплення лобових частин обмоток статора ТГ визначається тим, що вони, особливо на виході з паза осердя, є більш вразливими стосовно можливих механічних пошкоджень, ніж пазова частина, оскільки виконати надійне кріплення лобової частини обмотки значно складніше.

Існуючі типи кріплення лобових частин статорних обмоток можна розділити на три великі групи – кріплення шнурового, безшнурового і змішаного типів. Тобто лобові частини обмотки закріплені не жорстко і ослаблюються в процесі експлуатації, що спричинює більшу амплітуду їхньої вібрації, ніж у пазовій частині. Фірма «Парсонс» провела детальні дослідження [6] вібрації лобових частин обмотки статора на ТГ потужністю 200 і 500 МВт, 3000 об/хв. На основі проведених досліджень зроблено висновки: зі зростанням потужності генератора вібрація зростає за нелінійним законом; у районі головок лобових частин обмотки амплітуда вібрації є найбільшою.

Суттєвим недоліком конструкції торцевої зони існуючих ТГ є відсутність жорсткого кріплення стержнів обмотки статора на ділянці від необсічених крайніх пакетів осердя до виходу стержнів на вигін – «евольвенту», що призводить з часом до ослаблення кріплення лобових частин обмотки. В процесі експлуатації ТГ у разі протікання електричного струму по стержнях обмотки статора між ними виникають значні електродинамічні зусилля, які намагаються виштовхнути стержні з пазів осердя. Утримують стержні на своїх місцях пазові та кінцеві клини, що спираються своїми трикутними виступами на трикутні вирізи в стінках пазів осердя. Все це є надійним до початку обсічки крайніх пакетів. У зоні обсічки кінці клинів вже не спираються на вирізи через вкорочені зубці у торцевій зоні осердя, тому ділянка стержнів обмотки в зоні від обсічки пакетів і до вигину стержнів на «евольвенту» жорстко не закріплена клинами. Досвід експлуатації показує також, що в процесі роботи заклинювання пазів статорів ТГ втрачає початкову щільність [1]. При капітальних ремонтах нерідко виявляється, що крайні пазові клини місцями переміщуються в пазах і виникає необхідність їхнього переклинювання з установкою під клини додаткових прокладок.

При цьому важливе значення має довжина консольної частини верхніх стержнів від місця жорсткого закріплення в пазу останнього необсіченого пакета осердя до місця прикладення електродинамічних зусиль у лобовій частині. Збільшення цієї довжини призводить з часом до ослаблення кріплення лобових частин обмотки внаслідок дії електродинамічних сил і теплової деформації, що впливає на характеристики лобових частин. Ці питання досліджувалися, проте залишилися недостатньо вивченими. Наприклад, у [7] було розглянуто вплив конструктивних рішень на термомеханічні переміщення та напруження елементів кінцевої зони статора ТГ, при цьому не досліджувався їхній вплив на показники вібрації. Тому виникає необхідність проведення додаткових досліджень.

© Кучинський К.А., Крамарський В.А., Тітко В.О., Гуторова М.С., 2019  
ORCID ID: \*<http://orcid.org/0000-0003-4003-6721>; \*\*<http://orcid.org/0000-0002-3974-0554>;  
\*\*\*<http://orcid.org/0000-0003-4259-7530>

У зв'язку з цим **метою роботи** є зменшення механічних характеристик та напружень у лобовій частині обмотки статора турбогенератора шляхом вдосконалення конструкції кріплення стержня на виході з осердя.

**Розрахункова модель та отримані результати.** Викладено результати розрахункової оцінки механічних переміщень та напружень лобової частини обмотки статора ТГ потужністю 300 МВт під дією однієї складової загальних зусиль, а саме, прикладених до неї періодичних радіальних електродинамічних зусиль для номінального режиму навантаження. При цьому оцінку електродинамічних зусиль, що діють на лобові частини обмотки, проведено згідно з [8]. Математичним об'єктом розрахунків є частина стержня обмотки у вигляді консольної балки, яка жорстко закріплена з однієї сторони і навантажена розподіленим вздовж лобової частини механічним зусиллям. Розв'язок задачі проводився чисельним методом скінченних елементів (МСЕ).

Підхід за МСЕ, відомий як метод переміщень, еквівалентний мінімізації повної потенційної енергії системи, вираженої через поле переміщень. У процесі мінімізації потенційної енергії пружного тіла отримуємо алгебраїчне рівняння для елемента (симплекс-трикутника) відносно невідомих переміщень  $U_i$  у його вузлах

$$[k] \cdot [U_i]^T = \{f\},$$

де  $[k]$  – матриця жорсткості елемента (функція його геометрії та механічних властивостей);  $\{f\}$  – вектор навантаження, обумовлений об'ємними, вузловими силами, поверхневими навантаженнями і тепловою дією [9].

Після визначення переміщень у вузлах розраховуються компоненти деформацій в елементі, а далі за законом Гука або через вузлові переміщення – величини напружень  $\sigma$ .

Результати розрахунків у разі жорсткого кріплення стержня обмотки тільки в основних (необсідених) зубцях осердя статора генератора (традиційне кріплення) представлено на рис. 1, а, рис. 2, а (відповідно механічні переміщення вузлів ізоляції та напруження в її елементах вздовж стержня на виході з паза: 1 – аксіальні (по осі  $x$  моделі); 2 – радіальні (по осі  $y$ ). Позначення кривих на наступних рисунках відповідають вказаному). У верхній частині рисунків схематично показані прямолинійна і вигнута частини стержня на виході обмотки з паза осердя. Максимальні радіальні переміщення в області головок лобових частин досягають величини 0,169 мм, напруження – 2,22 МПа, аксіальні значення – (-0,04) мм і 1,733 МПа відповідно.

Для оцінки ефективності зниження фрикційної взаємодії пазової частини обмотки статора і зубця в торцевій зоні [7] передбачалася можливість «звільнення» обмотки в торцевій зоні осердя на деяку глибину  $L_c$  (до 0,5 м при розрахунках). У висновках стверджується, що подібні заходи дають змогу обмежити нерівномірність розподілу тиску пресування вздовж статора і знизити на 20 % його термомеханічну складову в крайніх пакетах.

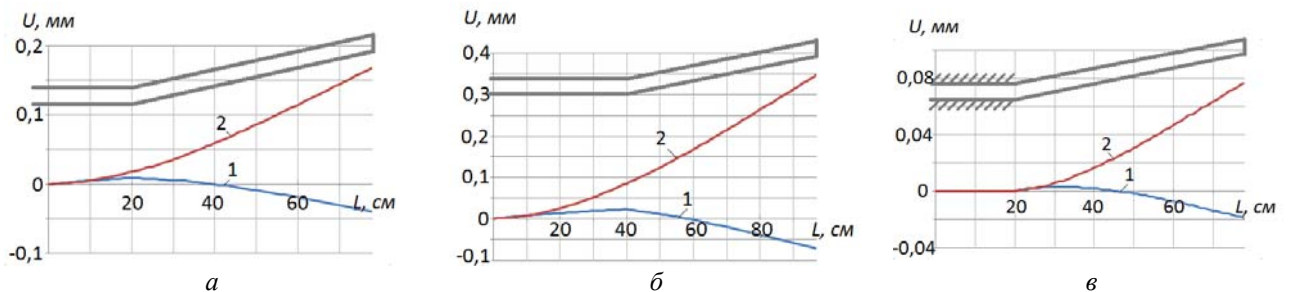


Рис. 1

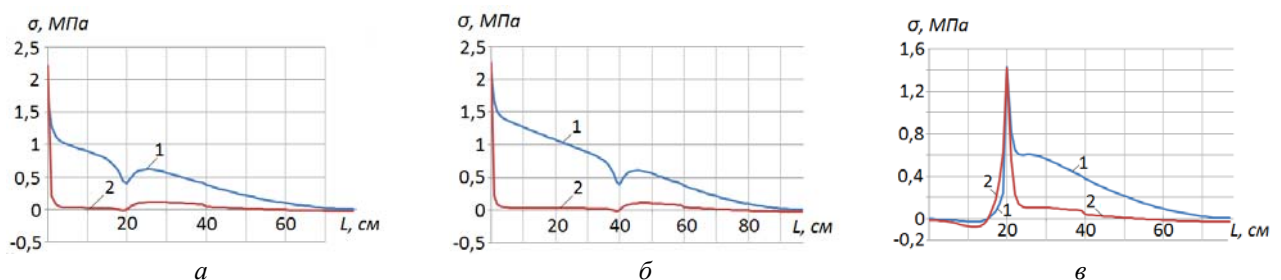


Рис. 2

У той саме час у [1] показано, що максимальні термонапруження в торцевій зоні осердя зі збільшенням довжини «вільної» ділянки обмотки у торці паза знижуються незначно. При цьому спостерігається лише ефект зміщення («міграції») їхніх локальних значень вглиб паза з точки зору впливу переміщень стержня на ступінь ослаблення пресування крайніх пакетів статора ТГ.

Для уточнення впливу додаткової «вільної» ділянки стержня в кінцевій зоні осердя на механічні характеристики лобової частини обмотки статора ТГ (величини вібропереміщень і напружень) було проведено чисельні розрахунки при  $L_c = 0,2$  м. Результати представлено на рис. 1, б, рис. 2, б.

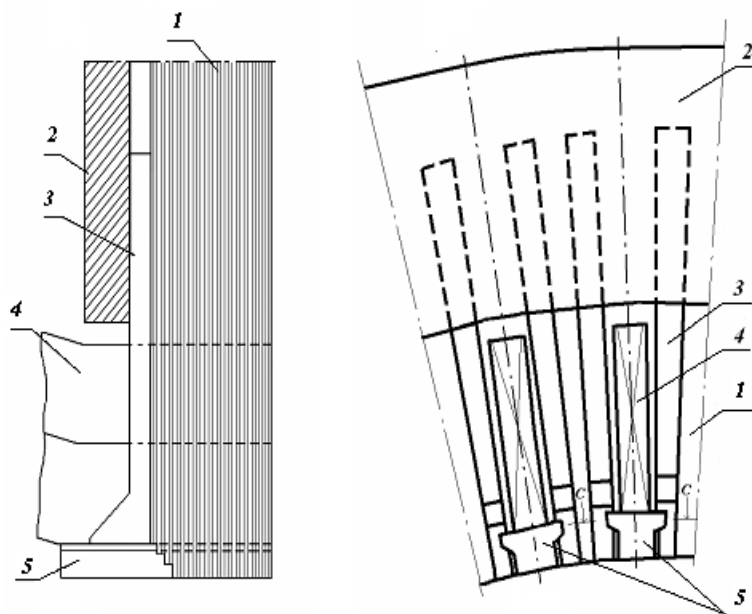


Рис. 3

рдя передбачає також фіксацію крайніх пазових клинів вздовж осьового напрямку для запобігання випадків ослаблення їхнього кріплення і випадіння.

Вдосконалені натискні пальці, подовжені по радіусу до внутрішнього діаметра розточки статора і в зоні кінцевих пазових клинів, мають вирізи в стінках з боку стержнів обмотки, співвісні з вирізами в пазах осердя. Кінцеві пазові клини збільшено по довжині та додатково закріплено у вирізах подовжених натискних пальців. Така конструкція дає змогу значно подовжити зону кріплення стержнів обмотки статора на виході з осердя та скоротити її консольну частину [10]. При цьому максимальні радіальні і аксіальні переміщення вузлів ізоляції стержня знижуються від 0,169 до 0,077 мм і від -0,04 до -0,019 мм відповідно, а механічні напруження від 2,22 до 1,427 і від 1,73 до 1,420 МПа в порівнянні з традиційним кріпленням (рис. 1, в, рис. 2, в). У результаті покращуються вібраційні показники лобової частини обмотки і всієї машини в цілому.

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити наступні **висновки**.

Чисельні розрахункові дослідження показують, що жорстке кріплення стержнів обмотки статора турбогенератора на прямолінійній ділянці після виходу її з паза поліпшує механічні характеристики лобових частин. Визначено ступінь впливу вдосконаленої конструкції кріплення стержня в торці паза статора машини (в порівнянні з традиційним кріпленням) на величини механічних переміщень і напружень в ізоляції обмотки: максимальні радіальні та аксіальні переміщення вузлів ізоляції стержня знижуються від 0,169 до 0,077 мм і від -0,04 до -0,019 мм відповідно, а механічні напруження від 2,22 до 1,427 і від 1,73 до 1,420 МПа.

1. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Електросила*. 2004. № 43. С. 56–64.

2. Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Уменьшение повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевой зоне (анализ, гипотезы, эксперимент). *Електротехника и электромеханика*. 2014. № 1. С. 37–39.

3. Кузнецов Д.В., Маслов В.В., Пикульский В.А., Поляков В.И., Поляков Ф.А., Поляков Ф.А., Худяков А.Н., Шандыбин М.И. Дефекты турбогенераторов и методы их диагностики на начальной стадии появления. *Електрические станции*. 2004. № 8. С. 51–57.

4. 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.

5. Kuchynskyi K., Titko V., Hutorova M., Mystetskyi V., Khudyakov A., Prus V. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. Proc. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems MEES'17*. Kremenchuk, Ukraine, November 15–17, 2017. Pp. 308–311.

6. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.

7. Аврух В.Ю., Пикульский В.А., Чистиков А.А. Исследование возможностей снижения термомеханических нагрузок в статорах турбогенераторов. *Електрические станции*. 1986. № 4. С. 42–44.

У порівнянні з варіантом традиційного кріплення пазової частини обмотки за наявності «вільної» ділянки значення максимальних радіальних переміщень істотно (більш ніж у 2 рази) збільшуються (до 0,353 мм) і перевищують допустимі безпечні рівні вібрацій, напруження дорівнюють 2,264 МПа. Аксіальні величини за абсолютними значеннями також зростають до (-0,074) мм і 2,109 МПа.

Збільшити зону кріплення стержнів обмотки статора кінцевими клинами після виходу з осердя можна у разі застосування в кріпленні стержнів натискних пальців з вдосконаленою конструкцією (рис. 3: 1 – осердя, 2 – натискна плита, 3 – натискний палець, 4 – стержень обмотки, 5 – кінцеві пазові клини). При цьому подовжені кінцеві пазові клини будуть жорстко закріплені по всій довжині. В результаті довжина консольної частини лобової частини обмотки зменшиться приблизно на 20%. Запропоноване технічне рішення для конструкції кріплення стержня на виході з осердя

8. Титко А.И., Счастливый Г.Г. Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока: монография. К.: Наукова думка, 1976. 200 с.
9. 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.
10. Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Грубой О.П., Титко О.І., Пенський В.Ф., Мінко О.М. Статор електричної машини. Патент України № 99571, 2015.

УДК 621.313.322

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИХ КРЕПЛЕНИЯ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ СЕРДЕЧНИКА**

**К.А. Кучинский**, докт.техн.наук, **В.А. Крамарский**, канд.техн.наук, **В.А. Титко**, канд.техн.наук, **М.С. Гуторова**, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com)**

*Исследованы численным методом механические характеристики лобовых частей обмотки статора турбогенератора мощностью 300 МВт для различных вариантов крепления стержня в торцевой части статора при номинальной нагрузке. Приведено распределение радиальных и аксиальных механических перемещений и напряжений узлов изоляции по длине лобовой части стержня под действием электродинамических усилий. Проведена оценка изменений указанных характеристик при ослаблении крепления стержней в торцевой части статора. Для уменьшения перемещений лобовой части обмотки предложена новая усовершенствованная конструкция ее крепления на выходе из сердечника. Библ. 10, рис. 3.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, торцевая зона, обмотка статора, метод конечных элементов, механические перемещения и напряжения.

**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE TURBOGENERATOR STATOR OUTHANG AT VARIOUS OPTIONS OF FIXING AT A CORE END ZONE**

**K.A. Kuchynskiy, V.A. Kramarsky, V.A. Titko, M.S. Hutorova**

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

**pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com)**

*The mechanical characteristics in a copper and isolation of the turbogenerator 300 MW stator winding under a nominal loading has been searched by a numeral method at the different variants of fixing in the core end zone. Distribution of a radial and axial movements and a mechanical tension in isolation on a length of an outhang bar under action of an elektrodynamical forces is received. Changes of the indicated above characteristics when weakened a fixing of an outhang bars in a stator end zone are estimated. The new advanced design of a fixing it at an exit from a core for minimization a moving of a turbogenerator stator outhang is offered. References 10, figures 3.*

**Key words:** turbogenerator, end area, stator winding, finite element method, mechanical movings and stresses.

1. Golodnova O.S., Rostik G.V. The analysis and actions for the prevention of damages of cores of stators turbogenerators. *Elektrosila*. 2004. No 43. Pp. 56–64. (Rus)
2. Shumilov Yu.N., Shtogrin A.V. Reduction of damageability of stators of the powerful turbogenerators caused by vibration in a face zone. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2014. No 1. Pp. 37–39. (Rus)
3. Kuznetsov D.V., Maslov V.V., Pikulsky V.A., Polyakov V.I., Polyakov F.A., Khudyakov A.N., Shandybin M.I. Defects of turbogenerators and methods of their diagnostics at an initial stage of manifestation. *Elektricheskie stantsii*. 2004. No 8. Pp. 51–57. (Rus)
4. Zozulin Yu.V., Antonov O.Ye., Bychik V.M., Borychevskiy A.M., Kobsar K.O., Livshyts O.L., Rakohon V.H., Rohovyi I.Kh., Khaimovych L.L., Cherednyk V.I. Creation of new types and modernisation of acting turbogenerators for thermal power plants. Kharkiv: PF Kolegium, 2011. 228 p. (Ukr)
5. Kuchynskiy K., Titko V., Hutorova M., Mystetskiy V., Khudyakov A., Prus V. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. Proc. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems MEES'17*. Kremenchuk, Ukraine, November 15-17, 2017. Pp. 308–311.
6. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. Scientific principles of design of turbogenerators. Leningrad: Nauka, 1986. 184 p. (Rus)
7. Avruch V.Yu., Pikulskii V.A., Chistikov A.A. Study the possibilities for reducing thermomechanical loads stators turbogenerators. *Elektricheskie stantsii*. 1986. No 4. Pp. 42–44. (Rus)
8. Tytko A.I., Shchastliviy G.G. Mathematical and physical modelling of electromagnetic fields in electric machines of alternating current. Kyiv: Naukova dumka, 1976. 200 p. (Rus)
9. Kuchynskiy 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)
10. Kramarsky V.A., Cheremisov I.Ya., Gruboy O.P., Tytko O.I., Penskiy V.F., Minko O.M. Electric machine stator. Patent UA No 99571, 2015. (Ukr)

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 14.01.2019