

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.045>

## РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ І МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ІЗОЛЯЦІЇ ЛОБОВОЇ ЧАСТИНИ ОБМОТКИ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

**К.А. Кучинський\***, докт. техн. наук, **В.А. Крамарський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com), [kramarskijv@gmail.com](mailto:kramarskijv@gmail.com)

*Представлено результати чисельних досліджень розподілу вібропереміщень і механічних напружень в ізоляції лобової частини обмотки статора потужного турбогенератора під дією електродинамічних зусиль за різного конструктивного виконання пазового кріплення стержнів обмотки в кінцевій зоні осердя статора машини. Моделювання механічних процесів здійснено за допомогою чисельного методу скінченних елементів (МСЕ) у двомірній постановці. Розглянуто можливість вдосконалення конструкції з метою зменшення амплітуди коливань лобових частин обмотки статора. Бібл. 16, рис. 7.*

**Ключові слова:** турбогенератор, осердя статора, торцева зона, стержень обмотки, ізоляція, метод скінченних елементів, вібропереміщення, механічні напруження.

**Вступ.** Аналіз роботи ряду постачальників електроенергії страховими компаніями протягом останніх 15 років показав [1], що вібрація лобової частини обмотки статора (ОС) стала найважливішою причиною відмови турбогенераторів (ТГ). Масштаби ремонту, збитки, що виникають, та втрати виробництва електроенергії виявляються дуже дорогими.

Однією з найчастіших причин відмов ТГ у процесі експлуатації на атомних електростанціях було порушення цілісності кріплення лобових частин ОС, що пов'язано з несприятливими вібродинамічними характеристиками вузла «колектор дистилляту–патрубки–зовнішні трубопроводи» конструкції [2]. Вібрація лобової частини обмотки призводить до виходу її з ладу через стирання ізоляції або втому міді, розтріскування, внаслідок чого в зоні лобових досить часто під час експлуатації генераторів потужністю 1000 МВт відбувається електричний пробій на землю. Із загальної кількості всіх відмов відносний внесок такого виду пошкоджень становив 45,5 % (за діаграмою Парето [3, 4]). Сучасне кріплення повинно забезпечити мінімально можливий рівень коливання обмотки відносно осердя, щоб зменшити кількість таких пошкоджень.

Лобові частини обмоток електричних машин сконструйовані таким чином, що за нормальних обставин їхні механічні навантаження контролюються достатньо надійно, щоб запобігти ушкодженням. Проте, лобові частини можуть бути пошкоджені внаслідок [5]:

- ослаблення кріплення лобових частин і сполучної структури через механічне старіння й теплове розширення;
- невдалої конструкції кріплення лобових частин в умовах близьких до резонансу до первинних механічних сил частоти обертання та подвійної частоти мережі (100/120 Гц);
- аномальних умов експлуатації (несиметрія, коротке замикання тощо);
- відносного переміщення одного компонента щодо іншого, що може викликати стирання високовольтної ізоляції обмотки.

Вібрація лобових частин обмотки може призвести до розтріскування ізоляції стержня обмотки поблизу виходу з паза статора, а у важких випадках – до втомного розтріскування мідних провідників, що викликає значні дугові струми. Зрештою, будь-яка з цих проблем може призвести до замикання ОС на землю. За даними експериментальних досліджень потужних ТГ встановлено, що в разі недостатнього відпрацювання конструкції системи кріплення ОС її вібропереміщення в нормальних експлуатаційних режимах здатні досягти неприпустимо великих величин [6].



Роботи з дослідження рівня вібрації елементів конструкції в торцевій зоні статора ТГ проводяться провідними виробниками протягом десятиліть і тривають донині.

Відомі ймовірнісні методи дослідження вібраційних сигналів у задачах вібродіагностики вузлів електричних машин [7].

Порівняльне дослідження електромагнітної сили й механічної реакції обмотки до й після типових електромеханічних несправностей ТГ [8] дало змогу отримати аналітичний вираз для розрахунку сили, що діє на лобову частину за одночасного порушення статичного ексцентриситету й міжвиткового замикання в роторі. Вплив міжвиткового короткого замикання в статорній обмотці на рівень вібрації її лобової частини досліджено в роботах [9, 10].

Однак, результати розрахунків досі не забезпечують необхідної для інженерної практики точності. Одна з основних причин такого стану полягає в недостатній надійності інформації щодо механічних параметрів обмотки й значною мірою в невизначеності пружних властивостей конструкції кріплення. Відповідні величини є вхідними даними для розрахунків, що в кінцевому підсумку визначає недостатню точність результатів.

Ситуація дефіциту інформації щодо вхідних даних для розрахунку коливань обмотки призводить до того, що в дослідженнях вібрації переважають експериментальні роботи.

Висока вартість модельних експериментів змушує проводити дослідження на натурних ТГ, а відпрацювання конструкцій кріплення проводити за результатами цих досліджень.

Нині всі потужні ТГ проходять вібраційний контроль на стендах підприємств-виробників і періодичний контроль – в перші роки експлуатації. Багаторічний досвід досліджень дав змогу виділити загальні для різних типів ТГ особливості вібрацій лобових частин ОС. Величини віброзміщень залежать від електродинамічних зусиль, що визначаються не тільки струмом у стержні, але й іншими параметрами обмотки. Використання недостатньо жорстких систем кріплення на генераторах великої потужності призводить до виникнення неприпустимого рівня вібрацій.

Проблема надійного закріплення статорної обмотки становить одну з основних труднощів конструювання потужних ТГ.

Великий обсяг розрахункових і експериментальних досліджень, які були виконані в минулі роки, все ж не дав змогу повністю вирішити завдання прогнозування рівня вібрації лобових частин ОС і є одним з найважливіших завдань проектування потужного ТГ. Це насправді легко пояснити, якщо розглянути безліч ідеалізацій у найбільш докладних розрахункових методиках. Необхідність ідеалізації розрахункової схеми пов'язана як із складністю геометрії лобових частин, характерами їхніх зв'язків між собою й опорними конструкціями, так і з особливостями технології, матеріалами, які застосовуються, недостовірністю багатьох вхідних даних. Навіть багатоваріантний підхід до теоретичної оцінки вібраційного стану за допомогою алгоритмів масових розрахунків коливань лобових частин дає занадто широкий діапазон прогнозованих величин, що вимагає водночас значного обсягу підготовчої та обчислювальної роботи.

**Метою роботи** є дослідження розподілу переміщень та напружень по довжині лобової частини обмотки статора турбогенератора, яка знаходиться під дією електродинамічних зусиль, та можливості поліпшення механічних характеристик шляхом вдосконалення конструкції закріплення стержнів обмотки на виході з пазу.

**Аналіз результатів чисельних досліджень.** Проаналізовано результати досліджень розподілу вібропереміщень і механічних напружень в ізоляції лобової частини ОС ТГ потужністю 1000 МВт під дією електродинамічних зусиль за різного конструктивного виконання пазового кріплення стержня в кінцевій зоні генератора. Моделювання механічних процесів здійснюється за допомогою чисельного методу скінченних елементів (МСЕ) у двомірній постановці.

Вирішення задачі пружності твердого тіла на основі МСЕ еквівалентне у варіаційній постановці мінімізації потенційної енергії системи, що виражена через поле переміщень. У процесі мінімізації потенційної енергії пружного тіла в польовій математичній моделі утворюються інтеграли, які входять у рівняння для елементів [11]. Матриця жорсткості елемента:

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B] dV. \quad (1)$$

Вектор навантаження елемента:

$$\{f\} = - \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} dV - \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV - \int_S [N]^T \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} dS = \{P\}, \quad (2)$$

де  $[B]$  – матриця градієнтів;  $[D]$  – матриця пружних констант;  $\{\epsilon_0\}$  – початкова деформація елемента;  $[N]$  – матриця функцій форми;  $X, Y, Z$  – об'ємні сили;  $P_x, P_y, P_z$  – поверхневі навантаження;  $\{P\}$  – вектор вузлових сил;  $S$  – площа елемента;  $V$  – його об'єм.

Для трикутного елемента з координатами вершин  $i, j, m$  у декартовій системі координат, товщиною  $t$ , модулем пружності  $E$ , коефіцієнтами теплового розширення  $\alpha$  і Пуассона  $\mu$ , відхиленням його температури від рівноважного значення  $\Delta T$  матриця градієнтів має вигляд:

$$[B] = \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де коефіцієнти  $b_i, b_j, b_m, c_i, c_j, c_m$  пов'язані з координатами вузлів елемента.

Матриця пружних констант:

$$[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тоді

$$[k] = [B]^T [D][B] tS, \quad (5)$$

$$\{f\} = [B]^T [D] \{\epsilon_0\} tS = \frac{\alpha E t \Delta T}{2(1-\mu)} \begin{Bmatrix} b_i \\ c_i \\ b_j \\ c_j \\ b_m \\ c_m \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Система рівнянь елемента для розрахунку невідомих переміщень  $U$  у вузлах:

$$[k] \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\}, \quad (7)$$

де змінні  $U$  з індексами «2» (тобто у двовимірній постановці задачі) відповідають величинам переміщень вздовж осі  $y$ , а з індексами «2-1» – вздовж осі  $x$ .

Відомо, що найбільші вібрації обмотки відзначаються в радіальному напрямку; тангенціальні переважно в 1,5...2 рази нижче. Водночас максимальні питомі електродинамічні зу-

силля діють на лобову дугу в радіальному напрямку й для ТГ потужністю від 800 до 1200 МВт становлять відповідно від 19,4 до 16,8 Н/см [12].

Розрахункова оцінка вібропереміщень і механічних напружень в елементах ізоляції лобової частини стержня проводилася для статорної обмотки ТГ потужністю 1000 МВт, що знаходиться під впливом радіальних електродинамічних зусиль у номінальному режимі.

На рис. 1, 2 відображено розподіли механічних характеристик ізоляції за довжиною стержня на виході з паза осердя за звичайних способів кріплення пазової частини обмотки в зоні крайніх пакетів ТГ (відповідно амплітуди вібропереміщень вузлів ізоляції та напруження в її елементах: 1 – аксіальні (вздовж осі  $x$  моделі); 2 – радіальні (вздовж осі  $y$ ); на наступних рисунках позначення кривих відповідають указаним). Водночас величини аксіальних вібропереміщень в області головок лобових частин складають  $-0,112$  мм, а максимальних радіальних –  $0,258$  мм; локальні максимальні механічні напруження (в торцевій зоні генератора) досягають значень  $2,300$  МПа і  $3,262$  МПа відповідно.

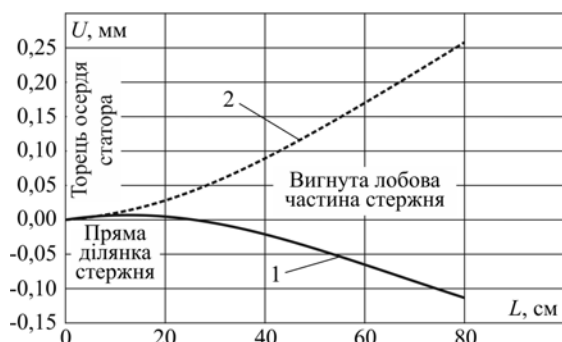


Рис. 1

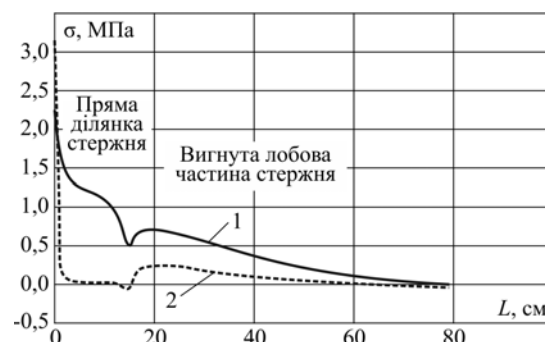


Рис. 2

Відомі варіанти виконання торцевої зони статора з «вивільненням» стержня обмотки в області крайніх пакетів осердя на певну глибину [13, 14]. Результати чисельного аналізу впливу незакріпленого в пазовій частині «відрідка»  $0,2$  м статорної обмотки ТГ на вібромеханічний стан її лобової частини показано на рис. 3, 4.

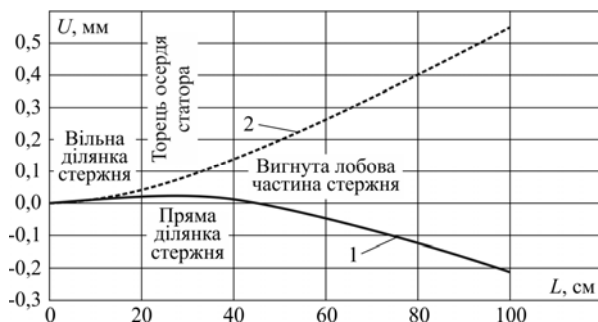


Рис. 3

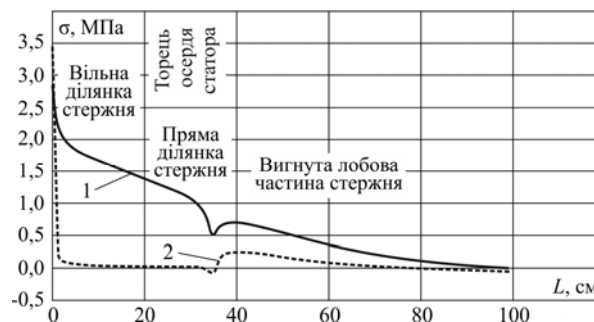


Рис. 4

За такого конструктивного закріплення пазової частини стержня порівняно зі звичайним варіантом суттєво підвищуються величини максимальних аксіальних і радіальних переміщень лобових частин (відповідно  $-0,211$  і  $0,554$  мм). Також збільшуються й максимальні значення механічних напружень (до  $2,895$  і  $3,470$  МПа).

Переміщення стержнів на виході з паза сприяють ослабленню вузлів кріплення ОС, що призводить до підвищення вібрації стержнів і, зі свого боку, до прискорення пошкодження деталей кріплення [15].

Поліпшення вібромеханічних характеристик стержневої обмотки може бути досягнуто завдяки застосуванню технічного рішення [16], яке спрямоване на фіксацію крайніх клинів у пазах осердя, а також задля уникнення можливості ослаблення їхнього кріплення й випадіння (рис. 5).

Сутність удосконаленої конструкції полягає в тому, що вона дає змогу зменшити довжину консольної частини стержнів обмотки на виході з осердя й у такий спосіб зменшити амплітуду її коливаль.

На рис. 5 поперечного розрізу осердя й ОС генератора позначено: 4 – натискні пальці; 7 – просічки в пальцях; 8 – дистанційні вставки; 10 – вирізи в зубцях осердя; 11 – вирізи в пальцях 4 в зоні клинів, співвісні з вирізами 12 в стінках пазів, у яких розташовані подовжені клини 13; 14 – стопорні планки до пальців 4 з болтовим з'єднанням 15; 19 – шпильки між пальцями; 20 – гвинти для кріплення шпильок до пальців.

Удосконалені натискні пальці подовжені по радіусу до внутрішнього діаметру статора і в зоні кінцевих клинів обмотки виконані за типом «чобітків» із трикутними вирізами в стінках на одній осі з вирізами в пазах осердя, а кінцеві клини збільшені за довжиною і шириною з боку «чобітків» і забезпечені додатковими трикутними виступами.

Позитивні зміни вібраційних показників лобової частини обмотки ілюструють рис. 6, 7.

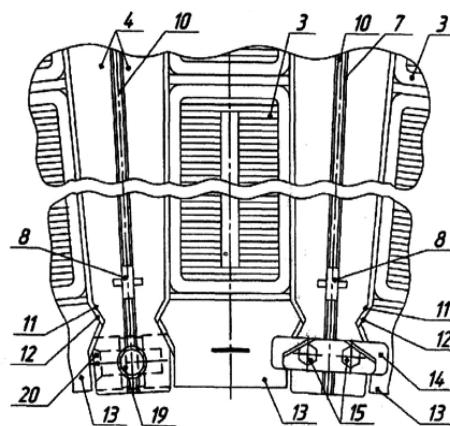


Рис. 5

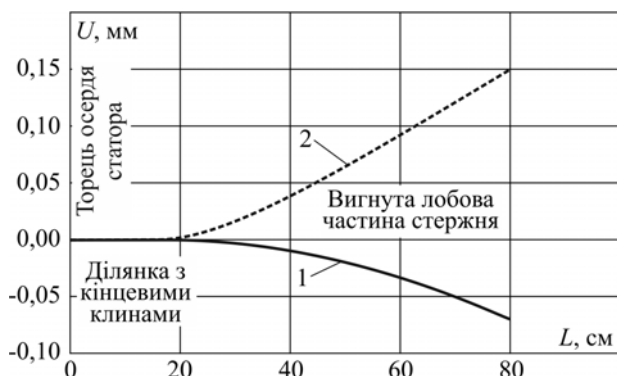


Рис. 6

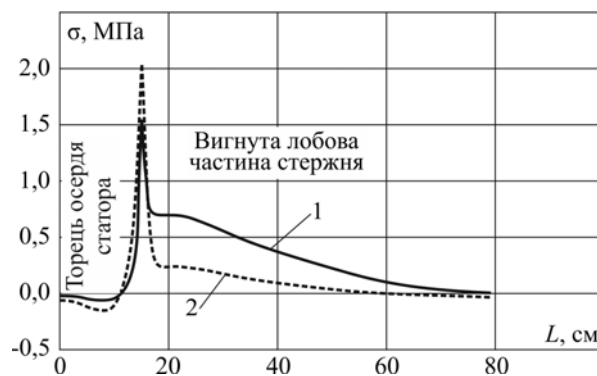


Рис. 7

Результати розрахунків показали практично дворазове (до -0,068 і 0,152 мм) зменшення відповідно максимальних аксіальних і радіальних переміщень вузлів ізоляції, що досягається завдяки удосконаленню конструкції кріплення пазової частини стержня порівняно з традиційною. Локальні максимальні значення механічних напружень знижуються в такому випадку приблизно в 1,5 раза (1,543 і 2,048 МПа).

#### Висновки.

1. Розроблено польові математичні моделі, комплексну методику та програмне забезпечення для чисельних досліджень механічних характеристик елементів обмотки статора потужних турбогенераторів.

2. Проаналізовано вплив різного конструктивного виконання кріплення пазової частини обмотки статора на вібраційний стан її лобової частини.

3. Показано, що представлене вдосконалення конструкції кріплення пазової частини стержня обмотки на виході з осердя дає змогу досягти майже дворазового зменшення аксіальних і радіальних переміщень вузлів ізоляції в лобовій частині обмотки статора й 50-відсотого – механічних напружень в ній на виході з пазу осердя.

Роботу виконано за держбюджетною 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. Letal J., Satmoko B., Manik N., Stone G. Stator End-Winding Vibration in Two-Pole Machines. *IEEE Industry Application Magazine*. November/December 2020. Pp. 23.
2. Горбатина Л.П., Жуков Д.В., Кади-Оглы И.А. Двухполюсные и четырехполюсные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для АЭС. Описание конструкции, опыт эксплуатации и пути совершенствования. *Электросила*. 2003. № 42. С. 16–21.
3. Шидловський А.К., Титко О.І., Федоренко Г.М. Електродинамічна стійкість з'єднувальних та вивідних шин обмотки статора та методи підвищення надійності турбогенераторів потужністю 1000 МВт. *Енергетика та Електрифікація*. 2008. № 9. С. 22–27.
4. Федоренко Г.М., Остапчук Л.Б., Дубік Г.О. Безпека, надійність потужних генераторів та шляхи їх підвищення. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 30. С. 39–43.
5. Система непрерывного он-лайн мониторинга вибрации лобовых частей обмотки статора генераторов и электродвигателей *Iris Power EVTracII* / ООО «ДиАйрис». URL: <http://diiris.com/oborudovanie/diagnostika-statora/monitoring-lobovyih-chastey-obmotki/neprevyivnyiy-monitoring-vibratsii-lobovyih-chastey-obmotki-statora/> (дата звернення: 08.09.2021)
6. Жимолохов О.М. Вибрация и надежность обмоток статоров турбогенераторов в стационарных режимах. URL: <https://www.dissercat.com/content/vibratsiya-i-nadezhnost-obmotok-statorov-turbogeneratorov-v-statsionarnykh-rezhimakh> (дата звернення: 08.09.2021)
7. Гижко Ю.И., Зварич В.Н., Мыслович М.В., Сысак Р.М., Тукало И.И. Перспективы модернизации систем виброконтроля и вибродиагностики оборудования электростанций на примере Трипольской ТЭС. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 53–61.
8. Yuling He. Electromagnetic Force and Mechanical Response of Turbo-Generator End Winding under Electro-mechanical Faults. *Mathematical Problems in Engineering*. December 2021. Vol. 1. Pp. 1–19.
9. He Y., Gerada D., Ming X.X. Impact of stator inter-turn-short-circuit position on end winding vibration in synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 36. No. 2. Pp. 22–27.
10. Meng Q., He Y. Mechanical response before and after rotor inter-turn short-circuit fault on stator windings in synchronous generator. Proc. of the 2018 *IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems*. HuZhou, China, December 2018. Pp. 1–7.
11. 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.
12. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.
13. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Электросила*. 2004. № 43. С. 56–64.
14. Кучинський К.А. Вплив ступеня закріплення обмотки в торці паза статора турбогенератора на термомеханічні характеристики ізоляції її стержня. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 61. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.031>
15. Виговський О.В. Аналіз, прогнозування та управління термомеханічними дефектами в системах водяного охолодження обмоток статорів потужних турбогенераторів АЕС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2015. Вип. 24. С. 20–26.
16. 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.

## CALCULATED ASSESSMENT OF VIBRATION MOVEMENTS AND MECHANICAL STRESSES OF INSULATION FRONT PART OF THE STATOR WINDING OF THE POWERFUL TURBOGENERATOR

**К.А. Kuchynskyi, V.A. Kramarsky**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com), [kramarskijv@gmail.com](mailto:kramarskijv@gmail.com)

Presented are the results of numerical studies of the distribution of vibration displacements and mechanical stresses in the insulation of the frontal part of the stator winding of a powerful turbogenerator under the influence of electro-dynamics forces for different constructive solutions of the groove fastening of the winding rods in the end zone of the generator stator core. Modeling of mechanical processes is carried out using the finite element numerical method (FEM) in a two-dimensional setting. The possibility of improving the design with the aim of reducing the amplitude of oscillations of the front parts of the stator winding was considered. Ref. 16, fig. 7.

**Keywords:** turbogenerator, stator core, end zone, winding rod, isolation, finite element method, vibration movements, mechanical stresses.

1. Letal J., Satmoko B., Manik N., Stone G. Stator End-Winding Vibration in Two-Pole Machines. *IEEE Industry Application Magazine*. November/December 2020. Pp. 23.
2. Gorbatina L.P., Zhukov D.V., Kadi-Ogly I.A. Two-pole and four-pole turbogenerators capacity of 1000 MW for nuclear power plants. Description of the design, operating experience and ways to improve. *Elektrosila*. 2003. No 42. Pp. 16–21. (Rus)
3. Shidlovsky A.K., Tytko O.I., Fedorenko H.M. Electrodynamics stability of connecting and output buses stator windings and methods for improving the reliability of 1000 MW turbine generators. *Energetika ta Elektrifikaziia*. 2008. No 9. Pp. 22–27. (Ukr)
4. Fedorenko H.M., Ostapchuk L.B., Dubik G.O. Safety, reliability of powerful generators and their ways increase. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. No 30. Pp. 39–43. (Ukr)
5. System for continuous online monitoring of vibration of the end parts of the stator winding of generators and electric motors Iris Power EVTracII / ООО «DiAyris» URL: <http://diiris.com/oborudovanie/diagnostika-statora/monitoring-lobovyih-chastey-obmotki/nepreryivnyiy-monitoring-vibratsii-lobovyih-chastey-obmotki-statora/> (accessed: 08.09.2021) (Rus)
6. Zhimolokhov O.M. Vibration and reliability of turbine generator stator windings in stationary modes. URL: <https://www.dissercat.com/content/vibratsiya-i-nadezhnost-obmotok-statorov-turbogeneratorov-v-statsionarnykh-rezhimakh> (accessed: 08.09.2021) (Rus)
7. Gyzhko Y.I., Zvarytch V.M., Myslovych M.V., Sysak R.M., Tukalo I.I. Perspectives of modernization of systems of vibration monitoring and vibrodiagnostics of electrical power plants equipment on the example of Trypilska TES. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2012. No 33. Pp. 53–61. (Rus)
8. Yuling He. Electromagnetic Force and Mechanical Response of Turbo-Generator End Winding under Electro-mechanical Faults. *Mathematical Problems in Engineering*. December 2021. Vol 1. Pp. 1–19.
9. He Y., Gerada D., Ming X.X. Impact of stator inter-turn-short-circuit position on end winding vibration in synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 36. No. 2. Pp. 22–27.
10. Meng Q., He Y. Mechanical response before and after rotor inter-turn short-circuit fault on stator windings in synchronous generator. Proc. of the 2018 *IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems*. HuZhou, China, December 2018. Pp. 1–7.
11. 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)
12. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. The scientific basis of designing of a turbogenerators. Leningrad: Nauka, 1986. 184 p. (Rus)
13. 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)
14. Kuchynskiy K.A. 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. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 61. Pp. 31–36. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.031>
15. Vygovskiy A.V. Analysis, prediction and control of thermomechanical defects in the water cooling system of the stator windings of powerful turbogenerators NPP. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya*. 2015. No. 24. Pp. 20–26. (Ukr)
16. Kramarskiy 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: 04.09.2022

Прийнята: 27.09.2022

Submitted: 04.09.2022

Accepted: 27.09.2022