

цевого пакета. Целенаправленне перераспределение потока охлаждающего водорода вместе с повышением поперечной теплопроводности стали пакета позволяет на 15 % снизить общий уровень нагревов торцевой зоны сердечника статора. Библ. 7, рис. 6, табл. 2.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, торцевой пакет, неравномерность нагрева, охлаждение.

O.H. Kensytskyi, D.I. Khvalin, N.L. Sorokina

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, 03057, Kyiv, Ukraine

Reduction of heating non-uniformity for laminated stator core end of high-power turbo-generator

The mathematical model of heat-exchange processes in the end laminating stator core sheets of high-power turbo-generator is developed. The heating of the teeth in the interfacial area and outside the area is analyzed. The ways to reduce the tangential non-uniformity and levels of heating of the stator core teeth are proposed. The directed redistribution of cooling hydrogen stream along with increased transverse thermal conductivity gives a possibility to decrease the total heating of the end stator core sheets by 15 %. References 7, figures 6, tables 2.

Key words: turbo-generator, stator core, end laminating sheets, non-uniformity of heating, cooling.

Надійшла 27.11.2017

Received 27.11.2017

УДК 621.3.085.5 : 62-27

**ПРУЖНИЙ ЕЛЕМЕНТ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗУСИЛЬ В СТЯЖНИХ ПРИЗМАХ
ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

А.С. Левицький¹, докт. техн. наук, **Є.О. Зайцев²**, канд. техн. наук, **А.М. Смирнова³**

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

3 – Київський національний торговельно-економічний університет,
вул. Кіото, 19, Київ, 02156, Україна

e-mail: lev@ied.org.ua

Досліджено трубчастий пружний чутливий елемент (ПЧЕ) первинного перетворювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора. Запропоновано методика розрахунку трубчастого ПЧЕ, яка дає змогу проектувати конструкції вимірювачів зусиль при зміні навантажень у широкому діапазоні. Визначено аналітичні співвідношення для розрахунку розмірів елемента. Отримано функцію перетворення «зусилля – відносна поздовжня деформація» з урахуванням зміни площі поперечного перерізу елемента відповідно до коефіцієнта Пуассона. Розраховано відносну похибку, зумовлену нелінійністю функції перетворення. Встановлено аналітичні залежності інформаційного сигналу від зусиль у пружному елементі для тензорезистивних, ємнісних та волоконно-оптичних вимірювачів. Библ. 12, рис. 7.

Ключові слова: турбогенератор, осердя статора, стяжна призма, зусилля, вимірювання, трубчастий пружний елемент, функція перетворення, похибка.

Для оцінювання (у процесі складання, експлуатації та оглядів) стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора (ТГ) можуть бути застосовані вимірювачі зусиль у стяжних призмах. За результатами вимірювання з'являється можливість відрегулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя [3, 10].

Зручним способом вимірювання зусиль у призмах є застосування перетворювачів, які встановлюються під стяжні гайки, коли зусилля в стяжній призмі сприймається спеціальним пружним чутливим елементом (ПЧЕ) і перетворюється в пропорційний інформаційний сигнал. ПЧЕ є механічною, а перетворювач сигналу – електричною частиною вимірювача.

Використання сучасних електровимірювальних засобів в якості перетворювачів сигналів дає змогу реалізовувати перетворення вимірювальної величини в цифровий код з до-

силь високою точністю та роздільною здатністю. Але робочі характеристики ПЧЕ часто вже не задовольняють сучасним вимогам, що гальмує створення приладів високих класів точності. У зв'язку зі зростанням вимог стає актуальним вирішення проблеми підвищення якості ПЧЕ не тільки при виготовленні, а й при проектуванні. Це зумовило появу робіт, спрямованих на розвиток розрахункових і експериментальних методів.

На відміну від силових пружних елементів, які повинні мати хороші пружні властивості, до силівимірювальних пружних елементів ставляться додаткові вимоги. До них відносяться висока часова стабільність механічних характеристик, стійкість до дестабілізуючих факторів, наприклад, температури навколишнього середовища, змін атмосферного тиску тощо. Перераховані вимоги задовольняються за рахунок правильного вибору геометричної форми, розмірів, матеріалу та технології термообробки ПЧЕ.

Для перетворення «сила – інформаційний сигнал» у вимірювачах зусиль у стяжних призмах осердя ТГ можуть бути використані тензорезистивні [11], ємнісні [9] та оптоволоконні [7, 8] сенсори. У цих вимірювачах ПЧЕ перетворювача має форму полого циліндра (трубки), причому $D_{Cl} \gg h_{Cl}$, де D_{Cl} – зовнішній діаметр циліндра, h_{Cl} – висота циліндра. Циліндр під час вимірювання навантажується вдовж центральної осі.

Мета роботи – визначення функціональних залежностей перетворення «сила – вихідний сигнал» для кожного із зазначених перетворювачів з трубчастим ПЧЕ.

У пружних елементах залежності між діючою силою і виникаючими деформаціями мають бути однозначними та максимально простими (наприклад, лінійними). Це можна досягти, використовуючи пружні матеріали, механічна характеристика яких описується законом Гука [1, 2, 4-6]. Для ізотропного матеріалу з модулем пружності E , коефіцієнтом Пуассона ν та модулем зсуву G закон можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}; \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}; \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}. \end{cases} \quad (1)$$

Рівняння (1) описують поздовжні $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ та зсувні $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ деформації, які виникають у довільній точці пружного елемента, з нормальними $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ та зсувними напруженнями $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$.

Для повної механічної характеристики пружного елемента рівняння (1) доповнюються умовами рівноваги

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Системи (1) і (2) разом утворюють основні рівняння лінійної теорії пружності й визначають поведінку всіх можливих типів пружних елементів. Але практичне застосування формул (1) і (2) при проектних розрахунках навіть простих за формою елементів натрапляє на великі труднощі. Через це зазвичай відмовляються від застосування рівнянь (1) і (2), і з цього положення виходять, застосовуючи для практичних цілей найпростіші види деформа-

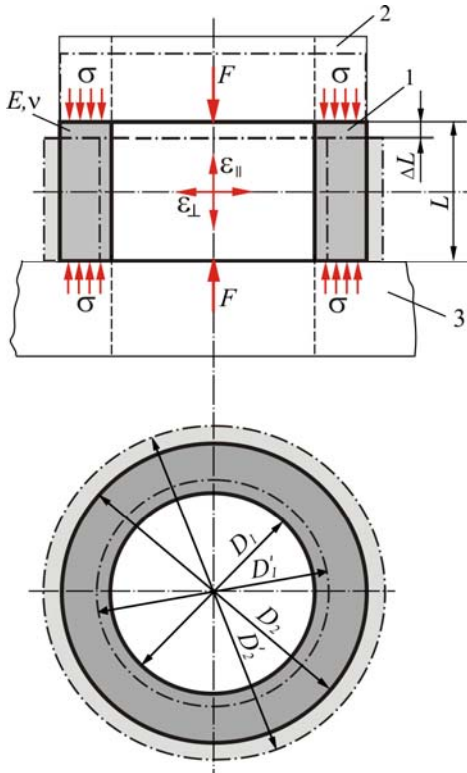


Рис. 1

лярна дії сили F , визначиться як

$$\varepsilon_{\perp} = \nu \frac{\sigma}{E} = \nu \frac{F}{SE}, \quad (4)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона (відношення поперечної деформації до поздовжньої при одноосьовому пружному стані).

Знаючи деформацію ε_{II} або напругу σ , які виникають під дією сили F , можна розрахувати необхідну площу поперечного перерізу S ПЧЕ:

$$S = \frac{F}{\varepsilon_{II} E} = \frac{F}{\sigma} = \frac{F \cdot L}{\Delta L \cdot E}, \quad (5)$$

де L – довжина вимірювальної бази; ΔL – номінальний вимірювальний хід (переміщення) під дією сили на базі L .

Отримане значення площі S ПЧЕ 1 має задовольняти умові

$$|\sigma_{\max}| \leq |\sigma_P|, \quad (6)$$

де σ_{\max} – напруга, яка виникає в елементі 1 під дією максимально допустимої сили F_{\max} ; σ_P – границя пропорційності матеріалу, тобто напруга, для якої дійсний закон Гука (рис. 2).

В області, обмеженій умовою (6), характеристика матеріалу лінійна, тобто стан зразка при розвантаженні повністю повертається до початку деформації. Але на практиці σ_P можна визначити лише з великими труднощами. Через це σ_P замінюють більшими значеннями межі пружності σ_E або значеннями напруги σ_a , яка після зняття навантаження дає залишкову деформацію ε_a . Зазвичай регламентують деформації ε_a рівні 0,001; 0,005; 0,01 або 0,02, а відповідні їм напруги позначаються як $\varepsilon_{0,001}$, $\varepsilon_{0,005}$, $\varepsilon_{0,01}$ і $\varepsilon_{0,02}$ (рис. 2). Величини ε_a наводяться в технічних умовах на матеріал. Для сталевих ПЧЕ при розрахунках приймають $\sigma_P = 0,2 \dots 0,5 \sigma_{0,01}$ [12]. Тобто

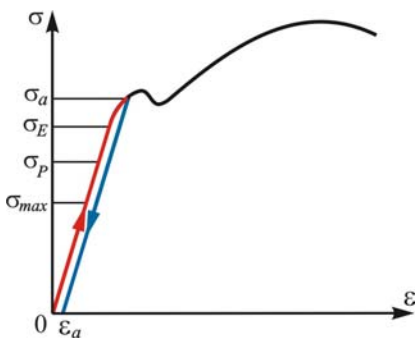


Рис. 2

$$|\sigma_{\max}| \leq (0,2 \dots 0,5) \sigma_{0,01}. \quad (7)$$

З огляду на те, що з іншого боку $|\sigma_{\max}|$ визначається як

$$|\sigma_{\max}| = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)} = \frac{4F_{\max}}{\pi(D_2^2 - D_1^2)} \leq (0,2 \dots 0,5) \sigma_{0,01}, \quad (8)$$

визначимо зовнішній діаметр D_2 ПЧЕ (враховуючи, що внутрішній діаметр D_1 задається діаметром різьбового кінця стяжної призми ТГ):

$$D_2 \geq \sqrt{\frac{4F_{\max}}{|\sigma_P| \pi} + D_1^2} \geq \sqrt{\frac{4F_{\max}}{\pi(0,2 \dots 0,5) \sigma_{0,01}} + D_1^2}. \quad (9)$$

Розрахуємо D_2 , коли $D_1 = 68$ мм, $F_{\max} = 44000$ кгс, $\sigma_T = 80$ кгс/мм² (сталь 40X). В ре-

зультаті отримаємо $D_2 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 44000}{0,5 \cdot 80 \cdot 3,14} + 68^2} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 44000}{0,5 \cdot 80 \cdot 3,14} + 68^2} \geq 77,62$ мм ≈ 78 мм.

Для точного розрахунку залежності «сила – відносна деформація» необхідно врахувати зміну площі поперечного перерізу ПЧЕ відповідно до коефіцієнта Пуассона [2]. Змінена площа S' складе

$$S' = \frac{\pi}{4} [(D_2')^2 - (D_1')^2] = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) (1 + \nu \varepsilon_{II})^2 = S (1 + \nu \varepsilon_{II})^2. \quad (10)$$

З урахуванням (10) дійсне значення відносної деформації ε'_{II} дорівнюватиме

$$\varepsilon'_{II} = \frac{F}{S'E} = \frac{F}{S(1 + \nu \varepsilon_{II})^2 E} = \frac{\varepsilon_{II}}{(1 + \nu \varepsilon_{II})^2}. \quad (11)$$

На рис. 3 показано залежності $\varepsilon = f(F)$ (рис. 3 а) і $\varepsilon' = f(F)$ (рис. 3 б), визначені для ПЧЕ ($D_1 = 68$ мм, $D_2 = 78$ мм), виготовленого із сталі 40X ($E = 2,1 \cdot 10^4$ кгс/мм², $\mu = 0,3$).

При цьому відносна похибка δ_{II} , спричинена зміною поперечного перерізу, складе

$$\delta_{II} = \frac{\varepsilon_{II} - \varepsilon'_{II}}{\varepsilon_{II}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{(1 + 0,3\varepsilon_{II})^2} \right) \cdot 100\%. \quad (12)$$

Залежність $\delta_{II} = f(F)$ показано на рис. 4.

Наведемо особливості застосування трубчастого ПЧЕ при тензорезистивному, смісному та волоконно-оптичному методах вимірювання зусиль у стяжних призмах ТГ.

Тензорезистивний метод [11]. Базується на тензоефекті й полягає в зміні активного опору провідника під дією механічної напруги. При цьому змінюються його довжина і площа поперечного перерізу. Відносна зміна опору провідника

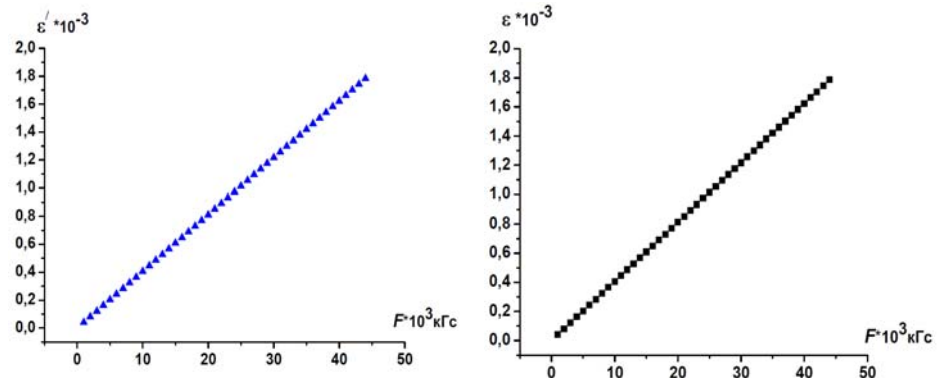


Рис. 3

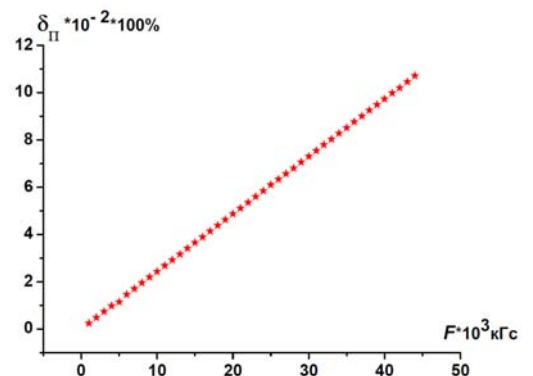


Рис. 4

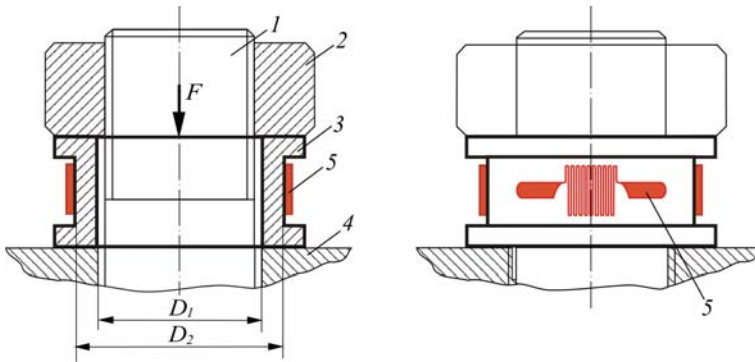


Рис. 5

Схема вимірювання за цим методом показана на рис. 5, де ПЧЕ 3 з наклеєними на ньому тензорезисторами 5 встановлюється на різьбовій частині стяжної призми 1 між стяжною гайкою 2 та натискною плитою 4 ТГ.

Під дією сили F ділянка ПЧЕ 3 стискується, і ділянка з наклеєними тензорезисторами деформується. Відносна зміна опору тензорезистора з урахуванням (3) та формули (13) запишеться як

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_{II} = \frac{4F(1+2\nu+K_\rho)}{\pi(D_2^2 - D_1^2)E}. \quad (15)$$

Використовуючи співвідношення (15), визначають силу F .

Висота ПЧЕ визначається габаритними розмірами тензорезисторів, їх кількістю та геометрією розташування.

Основними перевагами методу є відносна простота вторинних вимірювальних перетворювачів, наявність широкої номенклатури тензорезисторів у промисловості та наявність добре розроблених прийомів уникнення ряду специфічних похибок.

Застосування тензорезистивних перетворювачів дещо обмежується через повзучість, схильність до впливу температури навколишнього середовища і гістерезису. Повзучість і гістерезис тензометричних схем визначаються якістю наклеювання. До того ж сенсори потребують періодичних повторних градувань.

Ємнісний метод. Принцип дії заснований на вимірюванні електричної ємності плоскопаралельного конденсатора при зміні його проміжку, що дає можливість з високою роздільною здатністю (до 10^{-8} м) вимірювати лінійні переміщення і деформації. При цьому функція перетворення ємнісного сенсора зі змінним зазором є строго розрахунковою, тобто визначається тільки геометричними параметрами сенсора, через що немає необхідності у його таруванні. Захист ємнісного сенсора і сполучних провідників від впливу електричних полів може бути забезпечений вибором оптимальної геометрії електродів ємнісного сенсора та екрануванням. До магнітних полів ємнісні сенсори не чутливі.

У загальному вигляді одна з можливих схем вимірювання зусиль за ємнісним методом представлена на рис. 6 [9].

Сила F , що діє на стяжку призму 1 осердя, сприймається ПЧЕ 3, розміщеним між

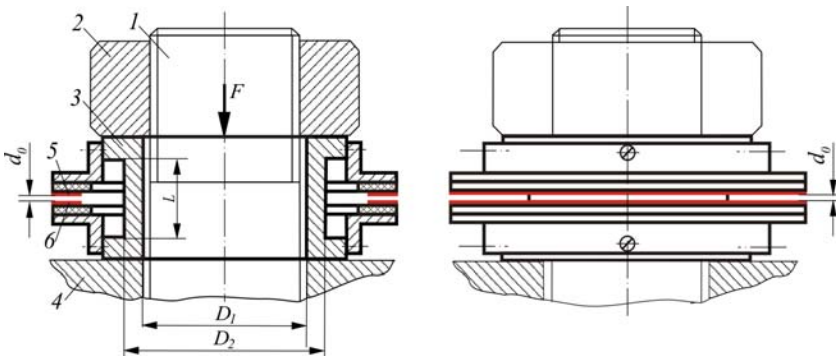


Рис. 6

стяжною гайкою 2 та натискною плитою 4 ТГ. Під дією сили F ділянка ПЧЕ довжиною L деформується, і її лінійна деформація складає

$$\Delta L = \varepsilon'_{II} L = \frac{L \cdot \varepsilon_{II}}{(1 + \nu \varepsilon_{II})^2} = \frac{4FLE(D_2^2 - D_1^2)}{\pi[(D_2^2 - D_1^2)E + 4\nu F]^2}. \quad (16)$$

З іншого боку, якщо початковий зазор ($F = 0$) між електродами 5 і 6 у вимірювальному конденсаторі був d_0 , то під дією сили F він зміниться і набуде значення d_x . Зміна зазору складе $\Delta L = d_0 - d_x$. Для конденсатора з двома плоскопаралельними електродами існує однозначна розрахункова функціональна залежність між ємністю C конденсатора та зазором d у ньому:

$$C = f(d) = \frac{K_C}{d}, \quad (17)$$

де K_C – постійний коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів вимірювального конденсатора та діелектричних властивостей середовища. Вимірявши ємність C_0 при зазорі d_0 і ємність C_x при зазорі d_x , можна визначити ΔL як

$$\Delta L = d_0 - d_x = \frac{K_C}{C_0} - \frac{K_C}{C_x} = K_C \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_x} \right). \quad (18)$$

Використовуючи формули (16) і (18), можна розрахувати силу стягнення F .

Висота L ПЧЕ та геометричні розміри конденсатора визначають чутливість цього ємнісного методу.

Волоконно-оптичний метод з застосуванням решіток Бреґґа (ВБР). Цей метод базується на ефекті зміни періоду ВБР, сформованої в оптичному скловолокні, під дією прикладених до волокна поздовжніх зусиль. Метод забезпечує завадостійкість до впливу потужних електромагнітних полів, значну дистанційність вимірювання (сотні метрів), можливість сформування в одному оптоволокні великої кількості первинних перетворювачів (сенсорів) – брегґівських решіток, забезпечуючи при цьому значне зменшення ліній зв'язку.

На рис. 7 показано схему вимірювання зусиль з застосуванням діелектричного фібергласового ПЧЕ 3, який встановлюється на призмі 1 ТГ і стискується між стяжною гайкою 2 і натискною плитою 4 ТГ [7]. На ПЧЕ 3 з легким натягом змонтовано кільце 5 товщиною h з того ж матеріалу, що і ПЧЕ 3. На кільце 5 спеціальним клеєм і за спеціальною технологією наклеєне скловолокно 6 з сформованими в ньому основної (яка вимірює поздовжню деформацію волокна 6) та термокомпенсаційної ВБР. Період Λ в обох ВБР однаковий. Механічна напруга ε , прикладена вповодж оптичного волокна 6, розтягне його серцевину і змінить період Λ обох ВБР.

Розрахуємо зміну періоду Λ . Під час навантаження силою F діаметр розташування скловолокна 6 зміниться і (з урахуванням коефіцієнта Пуассона ν_F для фібергласу) складе

$$D' = \left[(D_2 + 2h) + \nu_F \varepsilon_{II} (D_2 + 2h) \right] = (D_2 + 2h) \left(1 + \nu_F \frac{4F}{\pi (D_2^2 - D_1^2) E_F} \right), \quad (19)$$

де E_F – модуль пружності фібергласу.

Відносна зміна довжини кільця 5 складе

$$\varepsilon_5 = \frac{2\pi D' - 2\pi (D_2 + 2h)}{2\pi (D_2 + 2h)} = \left[\frac{D'}{(D_2 + 2h)} - 1 \right] =$$

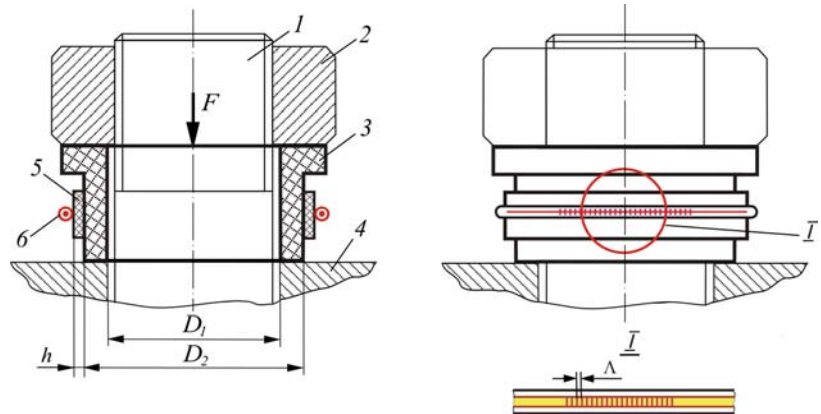


Рис. 7

$$= \left[\frac{(D_2 + 2h) \left(1 + \nu_F \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2) E_F} \right)}{(D_2 + 2h)} - 1 \right] = \nu_F \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2) E_F}. \quad (20)$$

При цьому період ВБР зміниться і буде дорівнювати

$$\Lambda' = \Lambda \varepsilon_5 = \Lambda \cdot \nu_F \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2) E_F}. \quad (21)$$

Зміна періоду призведе до зміни бреггівської довжини хвилі, яку система реєстрації перетворить у зміну інформаційного сигналу.

Висновки. Отримані результати дають змогу спроектувати трубчасті ПЧЕ для тензометричного, емнісного та волоконно-оптичного (з застосуванням ВБР) методів вимірювання зусиль у стяжних призмах осердя статора ТГ та оцінити їхні похибки.

1. Guide to the Measurement of Force. The Institute of Measurement and Control, London. – Originally published 1998. Reviewed and re-issued 2013. 46 p. Режим доступу: <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/forceguide.pdf> (дата звернення 07.10.2017).
2. Бауман Э. Измерение сил электрическими методами / пер. с немец. А.С. Вишенкова и С.Н. Герасимова. М.: Мир, 1978. – 430 с.
3. Шторгин А.В. Научно-технические мероприятия по уменьшению повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванной вибрацией в торцевых зонах: Дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05 «Электрические машины и аппараты». Киев, 2015. 161 с.
4. Dan Mihai Stefanescu. Handbook of Force Transducers: Principle and Components. – Berlin : Springer, 2011 – 612 p. Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?id=RjzO10gmXZYC&pg=PR21&lp> (дата звернення 07.10.2017).
5. Karl Hoffmann. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. HBM Test and Measuremen. 2012. 257 p. Режим доступу: http://www.kkgroup.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf. (дата звернення 13.11.2017).
6. Liu M., Zhou Z., Tao X., Tan Y. A dynamometer design and analysis for measurement the cutting forces on turning based on optical fiber Bragg Grating sensor. Prociding of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. July 6-8, 2012, Beiling, Chine. P. 4287–4290.
7. United States Patent No. US 20120026482 A1. Int. Cl. G01J5/48. Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators / George Franklin Dailey (US) – Appl. No. US 13/065,842; Pub. date Feb. 02, 2012.
8. Левицький А.С., Кобзарь К.О., Зайцев Є.О. Волоконно-оптичні вимірювачі зусиль в стяжних призмах турбогенераторів на основі решіток Брегга // *Гідроенергетика України*. 2017. № 3-4. С. 22–25.
9. Левицький А.С., Федоренко Г.М. Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро- і турбогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2009. № 4. С.35–39.
10. Пиккульский В.А., Чистиков А.А., Лифшиц А.Л. Исследование распределения плотности прессовки активной стали статора турбогенератора. *Электротехника*. 1990. №6. С. 9 – 13.
11. Федоренко Г.М., Бут А.А., Кузьмин В.В. и др. Методика и измерительные средства определения усилией пресовки в сердечнике статора мощного турбогенератора. *Техническая электродинамика*. 1991. № 4. С. 64–69.
12. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов. Москва: Машиностроение, 1977. 311 с.

УДК 621.3.085.5 : 62-27

А.С. Левицький¹, докт. техн. наук, Е.А. Зайцев², канд. техн. наук, А.М. Смирнова³

1, 2 – Інститут електродинамики НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

3 – Київський національний торговельно-економічний університет,

ул. Киото, 19, Київ, 02156, Україна

Упругий елемент преобразователя усилий в стяжних призмах сердечника статора мощного турбогенератора

Исследован трубчатый упругий чувствительный элемент (УЧЭ) первичного преобразователя усилий в стяжных призмах сердечника статора мощного турбогенератора. Предложена методика расчета трубчатого УЧЭ, которая позволяет проектировать конструкции измерителя усилий при изменении нагрузок в широком диапазоне. Определены аналитические соотношения для расчета размеров элемента. Получена функция преобразования «усилие - относительная продольная деформация» с учетом изменения площади поперечного се-

чения элемента в соответствии с коэффициентом Пуассона. Рассчитана относительная погрешность, обусловленная нелинейностью функции преобразования. Установлены аналитические зависимости информационного сигнала от усилия в упругом элементе для тензорезистивных, емкостных и волоконно-оптических измерителей. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, стяжная призма, усилие, измерения, трубчатый упругий элемент, функция преобразования, погрешность.

A.S. Levytskyi¹, I.O. Zaitsev², A.M. Smyrnova³

1, 2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

3 – Kyiv national university of trade and economics, Kyoto str., 19, Kyiv, 02156, Ukraine

Elastic sensitive element for force transducers of the effort in the powerful turbogenerators stator tightening prisms core

Investigated cylindrical elastic sensor element (ESE) of the force primary converter for the powerful turbogenerators stator tightening prisms core. The method of calculation of tubular ESE is proposed, which allows the design effort design gauges from load changes over a wide range. Analytical relations for calculating the dimensions of the ESE element are determined. Conversion function "force - relative longitudinal strain" with the changing cross sectional area of the element in accordance with Poisson's ratio is obtained. The relative error caused by the nonlinearity of the conversion function is calculated. The analytical dependencies of the information signal on the force in the elastic element for strain-resistive, capacitive and fiber-optic meters are established. References 12, figures 7.

Key words: turbogenerator, stator core, tightening prism, effort, cylindrical elastic sensor element, error, measurements, conversion function.

Надійшла 04.12.2017

Received 04.12.2017

УДК 621.365.51

ДВУХОБМОТОЧНЫЙ БЕЗЖЕЛЕЗНЫЙ ИНДУКТОР БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.Н. Карлов, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-корр. НАН Украины, **Р.С. Крищук**, канд. техн. наук, **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина
e-mail: dep7ied@ukr.net

Для устранения производственного шума и одностороннего притяжения при термообработке ферромагнитных лент предложено использовать безжелезные трехфазные высокочастотные индукторы бегущего магнитного поля. Для управления равномерностью нагрева полосы различных типоразмеров предложено использовать двухобмоточные индукторы с различными полюсными делениями и регулируемой величиной питающего напряжения каждой обмотки. Для стабилизации положения ленты по центру зазора предложено идентичное исполнение верхнего и нижнего двухобмоточных индукторов, что достигается размещением обеих обмоток в пазах каждого индуктора. Путем переключения питания фаз фазными токами каждой обмотки могут возбуждаться как согласно, так и встречно бегущие поля. Последние используются для компенсации при необходимости большого продольного натяжения ленты. С использованием системы уравнений Максвелла разработаны методы расчета полной комплексной мощности обеих обмоток и определены нормальные и тангенциальные силы, воздействующие на ферромагнитную полосу при ее произвольном асимметричном положении в зазоре. Установлено, что частота тока, при которой обеспечивается стабилизация ленты по оси зазора, зависит от геометрических размеров и электрофизических свойств ленты. Разработан метод расчета распределения тепловыделений и распределения температурного поля по длине и ширине движущейся полосы. Показано использование двухобмоточного индуктора для обеспечения равномерного нагрева ленты различных типоразмеров. Библ. 11, рис. 7.

Ключевые слова: линейный индуктор, индуктор бегущего поля, безжелезный индуктор, индукционный нагрев, метод расчета.