



ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., докт. техн. наук, Інститут електродинаміки НАНУ, Київ,  
КОБЗАРЬ К.О., канд. техн. наук, ДП "Завод Електроважмаш", Харків,  
ЗАЙЦЕВ Є.О., канд. техн. наук, Інститут електродинаміки НАН України, Київ

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАЧІ ЗУСИЛЬ В СТЯЖНИХ ПРИЗМАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ РЕШІТОК БРЕГГА

Розглянуто сучасний стан проблеми вимірювання зусиль в стяжних призмах потужних турбогенераторів. Описано волоконно-оптичний метод вимірювання зусиль в призмах з застосуванням решіток Брегга.

К л ю ч о в і с л о в а: турбогенератор, статор, осердя, стяжна призма, зусилля, вимірювання, волоконно-оптичний сенсор, решітка Брегга.

Контрольно-діагностичні параметри, що характеризують статор як механічну систему, є головними серед багатьох інших параметрів потужних турбогенераторів (ТГ) та гідрогенераторів (ГГ). Механічні властивості будь-якої технічної конструкції, у тому числі і конструкції статора, визначаються матеріалами, з яких він виготовлений, масою, геометрією і внутрішніми напруженнями як в конструкції в цілому, так і в окремих її частинах, а також умовами з'єднання окремих частин.

Основним вузлом у статорі генераторів є осердя. Воно становить близько 2/3 його маси. Механічною властивістю осердя статора, що визначає його працездатність, є наданий йому при виготовленні стан пружного стиснення. З часом, внаслідок експлуатаційних навантажень, виникає зниження зусиль, що стискають осердя. Це призводить до втрати запасу працездатності і є потенційною причиною небезпечних ушкоджень статора [1–4]. Щільність осердя статорів є однією з основних характеристик технічного стану генераторів, що в значній мірі визначає їхню експлуатаційну надійність. При експлуатації до-

сить часто спостерігається зниження щільності спресованості, що може призвести до відносного зміщення листів активної сталі, а також появи і розвитку наступних дефектів: розпушування зубців крайніх пакетів, викришування фрагментів листів активної сталі, місцевого замикання листів і нагрівання пакетів, що в остаточному підсумку може спричинити тяжкі аварії. Особливо гостро стоїть проблема контролю стану спресованості осердя для ТГ. Під час виготовлення необхідна щільність осердя статора потужного ТГ забезпечується його пресуванням. В спресованому стані осердя утримується за допомогою натискних фланців (плит) та стяжних призм. Вимірювання зусиль в стяжних призмах дозволяє контролювати стан спресованості осердя, а також дає змогу регулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя, яка виникає після зняття тиску пресу [5]. При оцінках зусиль в призмах необхідно врахувати цю істотну нерівномірність розподілу навантаження між окремими призмами. Ця нерівномірність обумовлена такими факторами: місцем розташування призм в осерді (в нижній або верхній його частині); особливостями технології виготовлення осердя; різницею температур призм та інше. Як показали, проведені в Державному підприємстві "Завод Електроважмаш" (м. Харків, Україна) спеціальні дослідження, коефіцієнт нерівномірності розподілу навантажень між окремими призмами в потужних ТГ досягає значення 2,6 ... 3, причому тільки близько 25 ... 30% призм працюють з напругою, що перевищують граничне зусилля, при якому починається їх руйнування [6].

На Рис. 1 зображена діаграма нерівномірності розподілу навантажень між окремими призмами, отримана експериментально для ТГ типу ТГВ-320-2П, осердя якого стягується 30 призмами. З цих призм тільки призми № 7 – 10 і № 22 – 25 працюють з навантаженнями, при яких починається їх руйнування. Ці дані є характерними і для потужних ТГ інших типів [6].

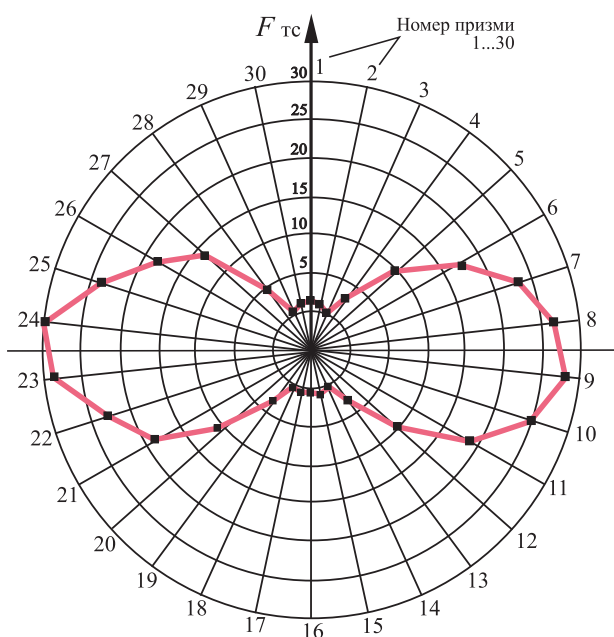


Рис. 1.



Для зниження пошкоджуваності призм необхідно насамперед забезпечити рівномірність розподілу зусиль між усіма призмами протягом усього періоду експлуатації ТГ. Це дозволить забезпечити механічні напруження в призмах в межах їх штатних розрахункових значень, а значить і рівномірність спресованості осердя. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок регулярного дослідження стану призм і корекції натягу призм для збереження рівномірності розподілу між ними напружень. Для цього найбільш бажаним було б вимірювання механічних зусиль в призмах в режимі он-лайн або з заданою періодичністю. Обробка та аналіз отриманих результатів вимірювання зусиль стало б основою для прийняття рішень про додаткову підтяжку ненавантажених призм.

На даний час існуючі методи та засоби вимірювання зусиль через різні причини не відповідають сучасним вимогам і дослідження зі створення таких вимірювачів є актуальними.

В роботі [7] описано спосіб вимірювання зусиль в стяжних призмах осердя статора ТГ з використанням тензорезисторів, які наклеюються на шийки призм. Недоліком способу є неможливість необхідного тарування вимірювальних тензомостів на самих призмах. Внаслідок цього зазначене тарування доводиться проводити на спеціальній тарувальній балці, що зазвичай значно обмежує широке застосування цього методу.

Більш перспективним є спосіб, коли вимірювальні тензорезистори наклеюються на кільцевий пружний елемент, який встановлюється під стяжні гайки [8]. В такому випадку можна тарувати кожний окремий сенсор до встановлення на турбогенераторі, а потім з необхідною періодичністю його повіряти. Недоліком способу є приклейка резисторів на пружний елемент, бо з плином часу, під дією температури та електромагнітного поля, клей старіє і метрологічні характеристики сенсорів значно погіршуються.

В роботі [9] запропоновано перетворювачі зусиль в стяжних призмах на основі ємнісних сенсорів зі змінним зазором та аналогічного кільцевого пружного елемента. Вимірювачі з такими перетворювачами дають можливість із високою чутливістю і точністю вимірювати малі лінійні деформації останнього. Ефективний захист від впливу електричних полів забезпе-

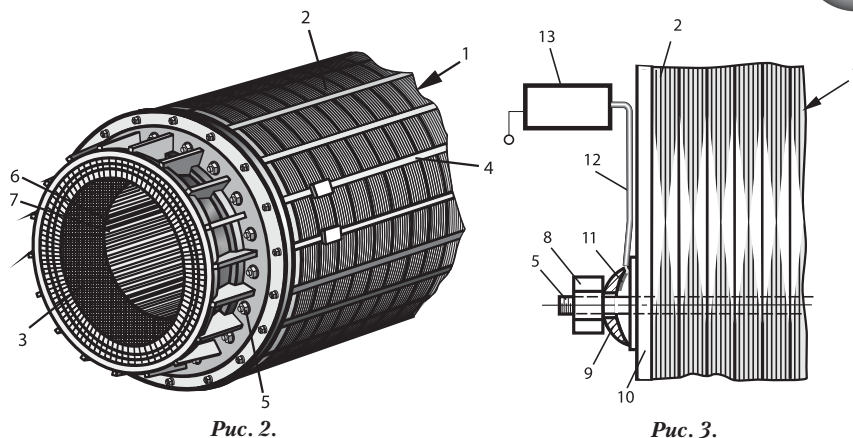


Рис. 2.

Рис. 3.

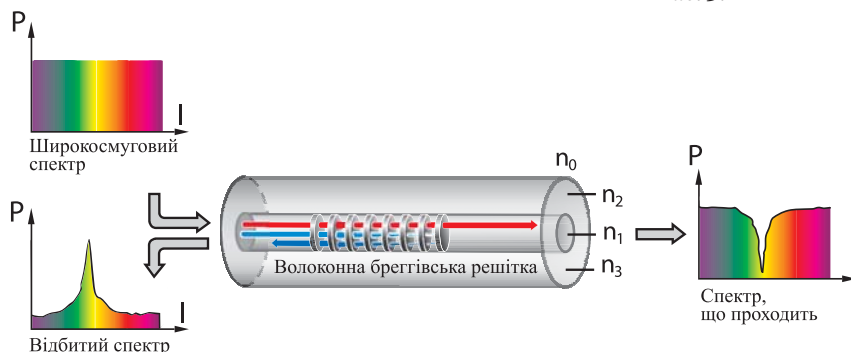


Рис. 4.

чується простим екрануванням сенсора (роль екрана зазвичай виконує електричний корпус і арматура) та сполучних проводів. До магнітних полів ємнісні сенсори не чутливі. Недоліком методу є обмежена дистанційність вимірювання, тобто відстань між сенсором та вторинним вимірювальним перетворювачем без зниження точності не може бути більшою, ніж 10–15 метрів.

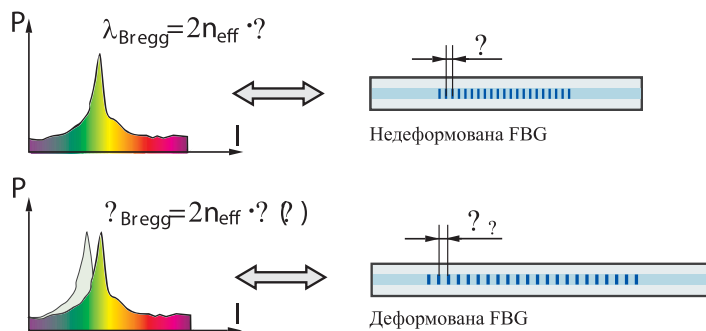


Рис. 5.

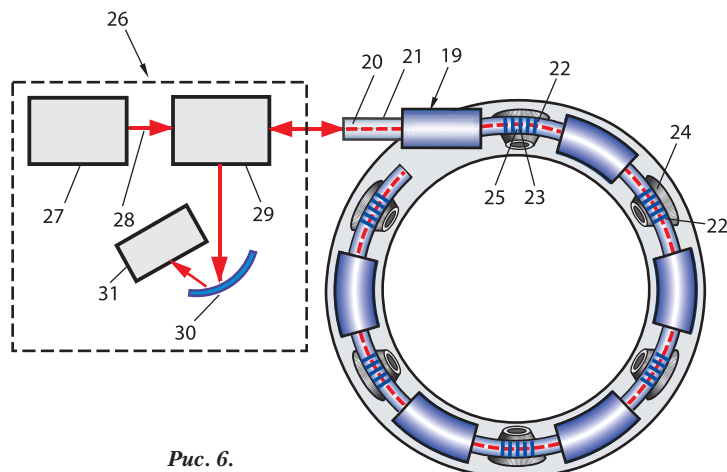


Рис. 6.



Останнім часом в літературі (в основному зарубіжній) з'явилися повідомлення про розробку вимірювачів зусиль в стяжних призмах з використанням волоконно-оптичних бреггівських решіток (ВБР), які як і тензорезистори, наклеюються на спеціальні пружні елементи, що встановлюються під гайки [10, 11]. Незважаючи на те, що технологія виготовлення таких волоконно-оптичних вимірювачів на даний час є досить складною і дорогою, вимагає застосування спеціального технологічного та метрологічного обладнання, ці вимірювачі мають велику перспективу в застосуванні, особливо враховуючи те, що окрім завдостійкості при роботі в потужних електромагнітних полях та значну дистанційність вимірювання (сотні метрів), вони дають можливість сформувавши в одному оптоволоконі велику кількість первинних перетворювачів (сенсорів) – бреггівських решіток, забезпечивши при цьому значне зменшення ліній зв'язку. Звичайно кількість первинних перетворювачів ВБР обмежена роздільною здатністю системи спектральної обробки прийнятого оптичного випромінювання й максимальною допустимою/розрахунковою деформацією ВБР.

В роботі [10] запропоновано волоконно-оптичний вимірювач зусиль стяжних призм ТГ, в якому оптичне волокно з решіткою Брега наклеюється на пружний силосприймаючий елемент у вигляді тарілчастої пружини.

На Рис. 2 показано загальний вид осердя статора потужного ТГ спеціальної конструкції. Основа осердя є циліндричний магнітопровід 1, сформований тонкими листами електротехнічної сталі 2. Ці листи утворюють внутрішній отвір (циліндричне розточення) 3) осердя за допомогою направляючих стержнів 4. Стяжні болти (або в інших конструкціях стяжні призми) 5 проходять через шари листів 2 і стискають їх. Стиснуті листи 2 у внутрішній частині осердя 1 формують ряди пазів 6 та ряди зубців 7 між ними.

На Рис. 3 показано вид збоку частини осердя статора 1, де відображено один із стяжних болтів 5, на різбову кінцеву частину якого накручується гайка 8, яка при закручуванні натискає на конічну шайбу (тарілчасту пружину) 9. При затягуванні гайки 8 пружина 9 затискається між гайкою 8 та плитою 10. При цьому пружина 9 деформується і її деформація вимірюється з використанням спеціального пристрою, в якому як первинний перетворювач застосовано волоконно-оптичну решітку ВБР 11, сформовану в оптичному волоконі 12.

Спеціальна вимірювальна система 13 забезпечує вимірювання та індикацію величини (деформації) напруження в пружині 9, а також калібровку (нижче буде більш докладніше описа-

но вимірювальну систему 13 та процедуру вимірювання. Зауважимо, що сенсор ВБР 11 може бути змонтований як на внутрішній поверхні пружини 9 (як показано на Рис. 3), так і альтернативно – на зовнішній.

Коротко зупинимось на особливостях вимірювання. Волоконна бреггівська решітка (ВБР) являє собою ділянку оптичного волокна (ОВ), в серцевині якого сформовано багаточислове селектує дзеркало, в якому показник заломлення (ПЗ) періодично змінюється в поздовжньому напрямку (Рис. 4). Іншими словами волоконна бреггівська решітка (ВБР) – розподілений бреггівський відбивач (різновид дифракційної решітки), сформований в серцевині оптичного волокна, здатний відображати довжини хвиль світла з дуже вузькою спектральною смугою з центром на довжині хвилі бреггівської решітки і пропускати всі інші.

Коефіцієнт відображення залежить від глибини модуляції ПЗ, а центральна довжина хвилі відображення визначається умовою Брега [12, 13]

$$\lambda_{Brogg} = 2 n_{eff} \Lambda,$$

де  $\lambda_{Brogg}$  – довжина хвилі бреггівського резонансу,  $n_{eff}$  – ефективний ПЗ серцевини волокна для центральної довжини хвилі,  $\Lambda$  – період бреггівської решітки.

Механічна напруга  $\epsilon$ , прикладена вповдовж оптичного волокна, розтягне його сердцевину і змінить період ВБР з  $\Lambda$  на  $\Lambda_1$  (Рис. 5). При цьому виникне зміщення бреггівської довжини хвилі

$$\lambda_{Brogg} = 2 n_{eff} \Lambda(\epsilon),$$

Система реєстрації перетворює зміну довжини хвилі в електричний сигнал.

Чутливий елемент такого сенсора не містить електронних компонент і тому він є повністю пасивним, що означає можливість використовувати його в зоні підвищеної вибухонебезпечності (наприклад в водневому середовищі), агресивності, сильних електромагнітних завад. На одне волокно може бути встановлено безліч бреггівських решіток, кожна з яких дає відгук на власній довжині хвилі. У цьому випадку замість точкового сенсора ми отримуємо розподілену систему реєстрації для ущільнення по довжині хвилі. Використання довжини хвилі світла як інформаційний параметр робить сенсор нечутливим до довготривалих дрейфів параметрів джерела живлення і приймача випромінювання, а також випадковим загасанням оптичної потужності у волоконі.

На Рис. 6 зображено структурну схему системи вимірювання зусиль в стяжних призмах на турбогенераторі з використанням ВБР. Умовно в системі показано шість контрольованих призм.



Основним чутливим елементом системи є оптичний світловод 19, утворений оптичним волокном 20, яке оточене захисною оболонкою 21, з показником заломлення більшим, ніж показник заломлення волокна 20. Сенсор ВБР 22 утворюється в волокні 20 шляхом формування визначеної кількості секцій-перерізів 23 з періодом  $\Lambda$ , які мають більший показник заломлення, ніж саме волокно 20, але менший, ніж показник заломлення оболонки 21. В волокні 20 можна сформувати необхідну кількість сенсорів ВБР 22, кожен з яких встановлюється на тарілчасту пружину 24. Ці сенсори спеціально створюються таким чином, щоб вони мали різні відстані 25 між елементами ВБР і завдяки чому відбивали промені з різними довжинами хвилі.

До складу системи також входить пристрій 26, за допомогою якого генерується оптичний сигнал та виявляються відбиті сигнали від одного, або декількох сенсорів ВБР. До складу пристрою 26 входить широкосмугове джерело світла 27, для генерації світлової пучок 28, який передається через оптичний відгалужувач 29 і поширюється вздовж оптичного волокна 20 до сенсора ВБР 22. Промінь, відбитий від сенсора ВБР 22, через відгалужувач 29 спрямовується до дисперсійного оптичного елемента 30 (78), який розподіляє світловий промінь за різною довжиною хвилі на різні ділянки ПЗС фотоприймача 31, або на інший оптичний матричний фотодетектор, наприклад, осцилограф Бреґга. Застосування широкосмугового джерела 27 та дисперсійного елемента 30 дозволяє виявляти декілька відбитих променів з різною довжиною хвилі може бути за допомогою пристрою 31. Використання останнього дозволяє реалізувати в одному оптичному волокні декілька сенсорів ВБР.

Спеціальна вимірювальна система (Рис. 2, поз. 13) розміщується за межами внутрішнього простору генератора. Але може виникнути необхідність обмеження числа ліній зв'язку, які необхідно вивести з герметичного простору машини. Тоді частина вимірювальної системи може бути встановлена всередині корпусу з забезпечення усунення впливу температури та вібрації.

**Висновки.** Описаний метод вимірювання зусиль в стяжних призмах потужних генераторів є перспективним і з подальшим розвитком та удосконаленням елементної бази оптичної системи знайде, без сумніву, знайде широке застосування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б.А. Алексеев. — 2-е изд., стер. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 144 с.
2. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б.А. Алексеев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. — 152 с.
3. *Голоднова О.С., Ростик Г.В.* О причинах поврежденной торцевых зон сердечников статоров турбогенераторов и мерах по их предупреждению // Энергетик. — 2005. — № 1. — С. 17—20.
4. *Кузнецов Д.В., Маслов В.В., Пиккульский В.А. и др.* Дефекты турбогенераторов и методы их диагностики на начальной стадии появления // Электрические станции. — 2004. — № 4. — С. 51—57.
5. *Остерник Э.С.* О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динамика та міцність машин, № 52. — Вестник НТУ "ХПИ", 2011. Режим доступа: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/vestnik/Динамика\\_и\\_прочность\\_машин/2011/52/20115220.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Динамика_и_прочность_машин/2011/52/20115220.pdf).
6. *Шторгин А.В.* Научно-технические мероприятия по уменьшению повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванной вибрацией в торцевых зонах : дис. ... кандидата техн. наук : 05.11.05 "Электрические машины и аппараты" / Шторгин Александр Валериевич. — К. 2015. — 161 с.
7. *Остерник Э.С.* Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашинах // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динамика та міцність машин, № 42. — Вестник НТУ "ХПИ", 2009. Режим доступа: [http://www.nbuv.gov.ua/old\\_jrn/natural/vcpi/dim/2009\\_42/20094219.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/vcpi/dim/2009_42/20094219.pdf).
8. *Федоренко Г. М., Бут А.А., Кузьмин В. В. и др.* Методика и измерительные средства определения усилий пресовки в сердечнике статора мощного турбогенератора // Техн. электродинамика. — 1991. — №4. — С. 64—69.
9. *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.
10. *United States Patent No.9,016,991 B2.* Int. Cl. F16B 31/02, H02 K1/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core / Twerdochlib Michael (US), Edward David (US), Diatzikis Evangelos V. (US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) — Appl. No. 13/863,473; Date of Patent Apr. 28, 2015.
11. *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.
12. *Васильев С.А., Медведков А.И., Королев И.Г. и др.* Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника.—2005.— Т.35.— №12.— С. 1085— 1103.
13. *Othonos A.* Fiber Bragg grating // Rev. Sci. Instrum. — 1997/— V.68. — #12/— P. 4309— 4341.

© Левицький А.С., Кобзарь К.О., Зайцев Є.О., 2017

