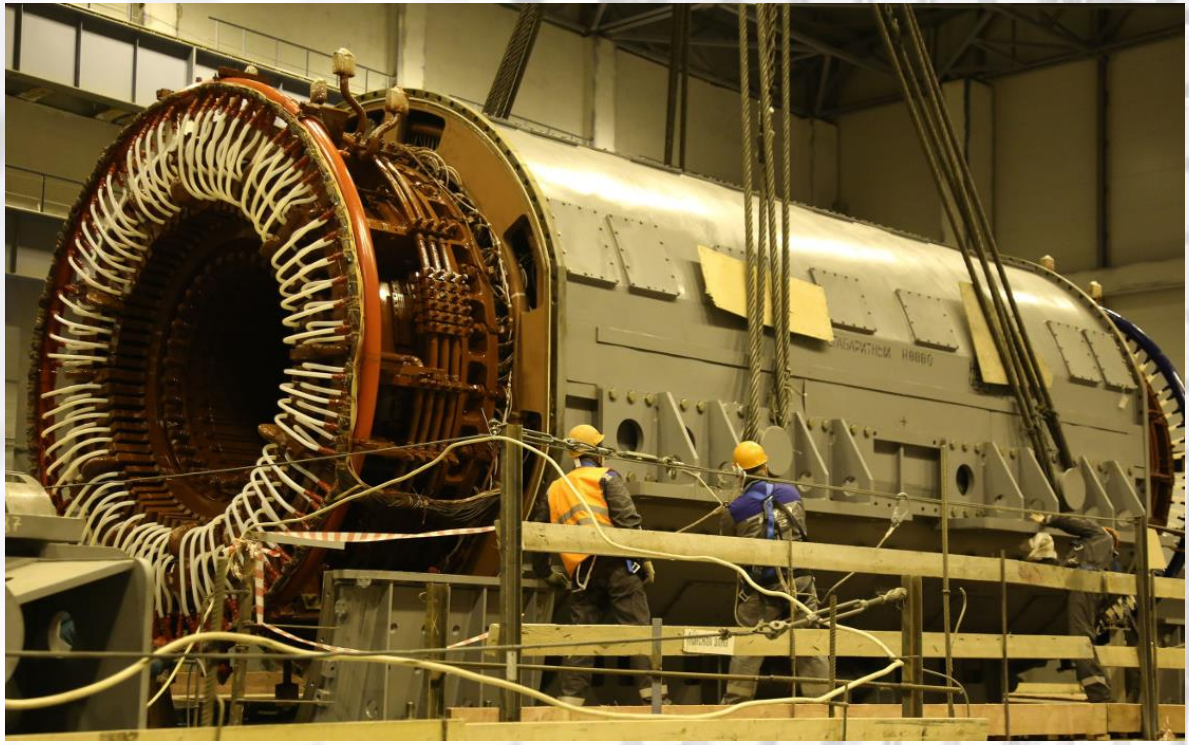
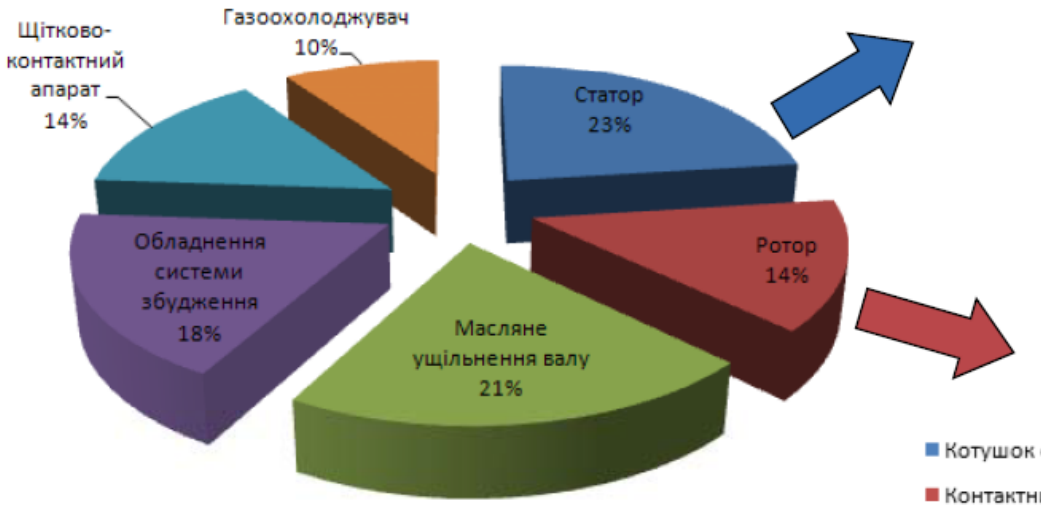
Національна академія наук України
Інститут електродинаміки Національної академії наук України

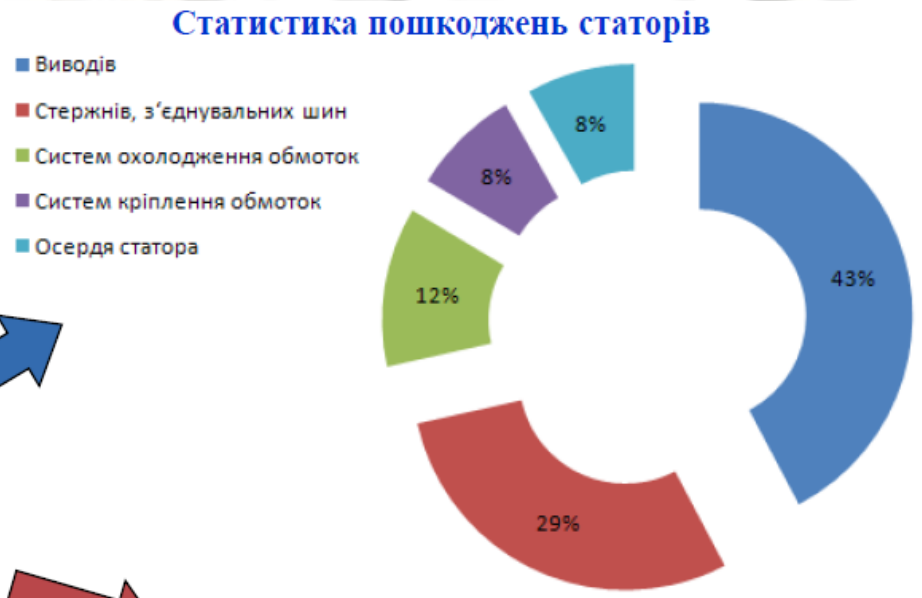
СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СПРЕСОВАНОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ



ЗАЙЦЕВ Євген Олександрович - доктор технічних наук,
провідний науковий співробітник Інституту електродинаміки НАН України

СТАТИСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ*





*За даними CIGRE

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА МЕТА РОБОТИ

Актуальність роботи визначається необхідністю забезпечення надійної та безаварійної роботи генеруючого обладнання АЕС, ТЕЦ та ТЕС ОЕС України. Ефективним способом забезпечення безпечного та надійного функціонування потужних турбогенераторів(ТГ) електростанцій, що входять до складу ОЕС України є контроль їх фактичного технічного стану, який визначається багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають ті, що характеризують його як механічну систему. Основним вузлом в статорі ТГ є його осердя, яке становить близько 2/3 його маси. Осердя не є найслабшим вузлом статора, однак, якщо інші складові частини статора, при справному осерді, можуть бути відремонтовані або замінені, то втрата працездатності власне осердям означає необхідність заміни всього статора.

Тому розробка і впровадження ефективних засобів контролю та діагностування стану спресованості є актуальним і перспективним напрямком вирішення науково-прикладної проблеми забезпечення безпечного та надійного функціонування потужного генеруючого енергоустаткування ОЕС України.

Мета роботи - є створення нових та удосконалення існуючих засобів контрою та діагностування стану осердя статора потужних турбогенераторів при їх виготовленні та експлуатації, що дозволяють забезпечити надійну та безаварійну експлуатацію генеруючого обладнання АЕС, ТЕЦ та ТЕС в ОЕС України.

НАУКОВА НОВИЗНА

Наукова новизна полягає в тому, що автором роботи отримано ряд важливих наукових та науково-технічних результатів, серед яких:

– вперше розроблено засоби контролю тиску спресованості осердя статора генератора із застосуванням секторних концентричних компланарних ємнісних вимірювачів ходу тарілчастих пружин системи пресування, в яких додатково використовується інформація про відповідність ходу тарільчатих пружин їх робочому діапазону, що дозволило підвищити достовірність контролю (Патент України на винахід № 120795);

– вперше для засобів контролю параметрів силового акумулятора стабілізації тиску пресування осердя статора турбогенератора при його експлуатації запропоновано метод корекції похибки, обумовленої перекосом електродів ємнісного сенсора, що дозволило забезпечити підвищення точності контролю стану пресування осердя статора на декілька порядків в реальному часі (Патент України на винахід № 119101);

– вперше запропоновано використання волоконно-оптичних та лазерних технологій в засобах контролю тиску спресованості осердя статора генератора при його виготовленні та експлуатації;

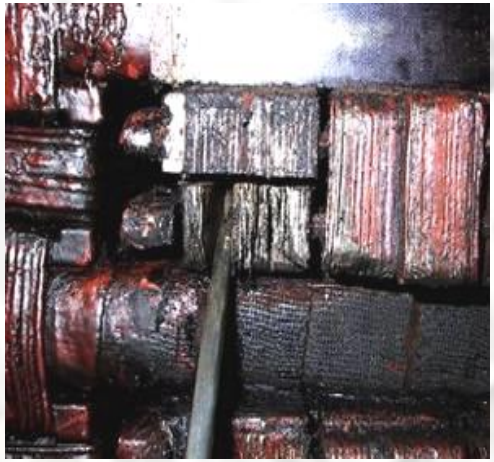
– запропоновано та розроблено структуру засобів контролю тиску спресованості осердя статора, в якій для забезпечення необхідних метрологічних характеристик використано фазові та частотно-фазові методи вимірювання (Патент України на корисну модель № 91534);

– розроблено експериментальні макетні зразки електронно-оптичного перетворювача, який забезпечує організацію завадостійкої та безпечної комунікації між сенсорами та системою збирання й оброблення контрольно-діагностичної інформації систем контролю та діагностування ступеню пресування осердя статора потужного генератора при його експлуатації та проведено лабораторні випробування зразків (Акт впровадження, 2018 р.);

– розроблено структуру апаратно-програмних засобів систем контролю тиску спресованості осердя статора генератора при його виготовленні та експлуатації, яка об'єднує переваги використання мікроелектронних та оптоелектронних технологій, що дало можливість створювати завадостійкі до дії потужних магнітних полів засоби контролю тиску спресованості осердя статора генератора;

– розроблено методики та алгоритми здійснення контролю та діагностування якості спресованості осердя статора потужних генераторів при його виготовлені, стендових випробуваннях та в умовах експлуатації на енергетичних об’єктах.

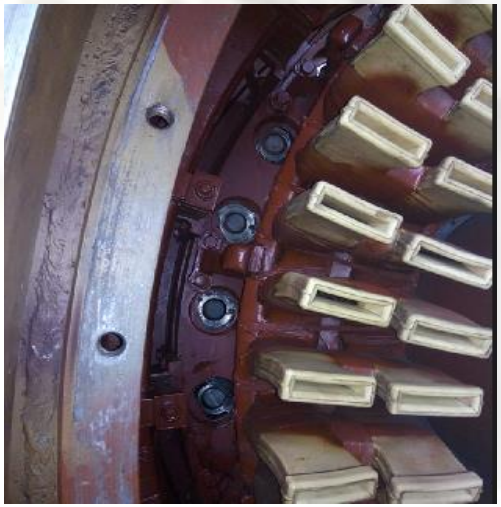
ПОШКОДЖЕННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА



Розшарування пакетів активної стали

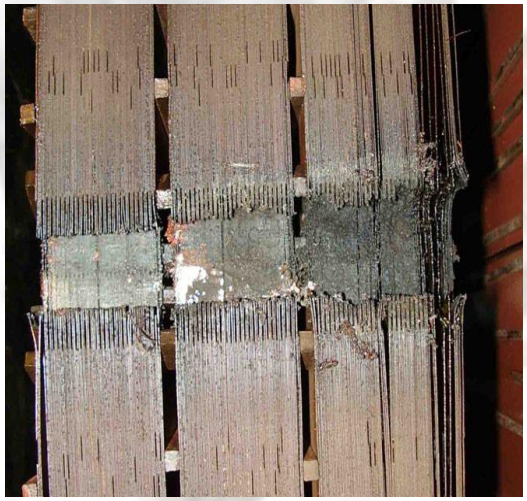
Місцеві перегріви

Оплавлення листів активної



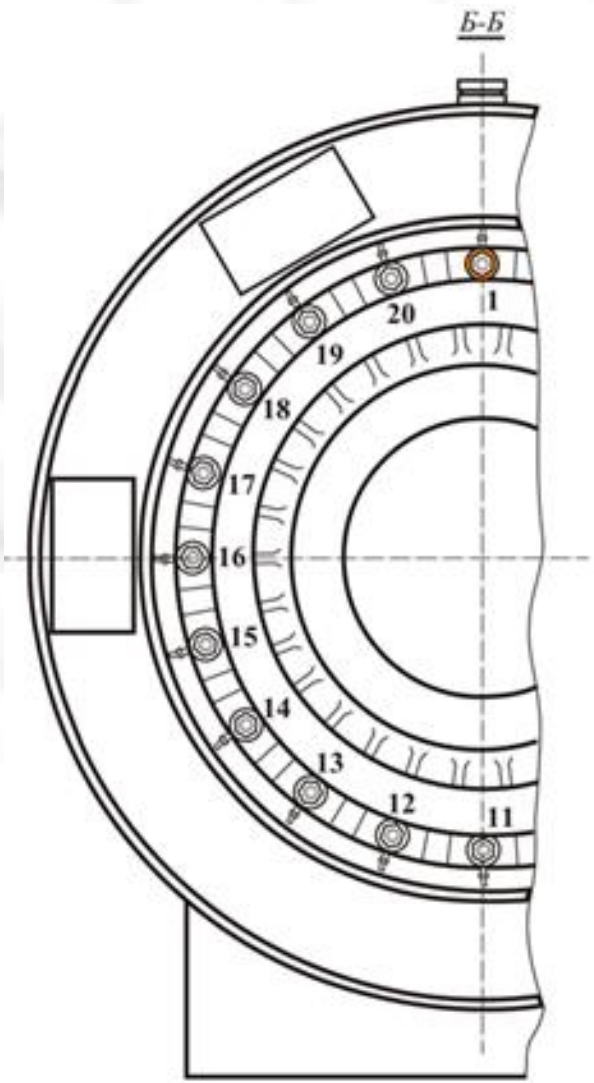
Обриви хвостовиків стяжних призм

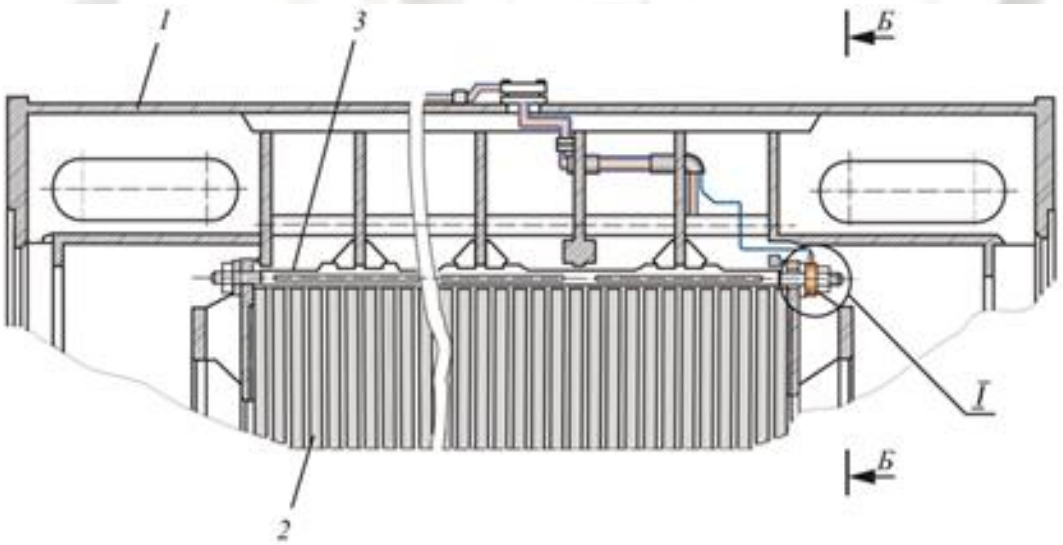
Вібраційна зношеність хвостовиків стяжних призм



Пошкодження осердя в наслідок дії підвищеної вібрації

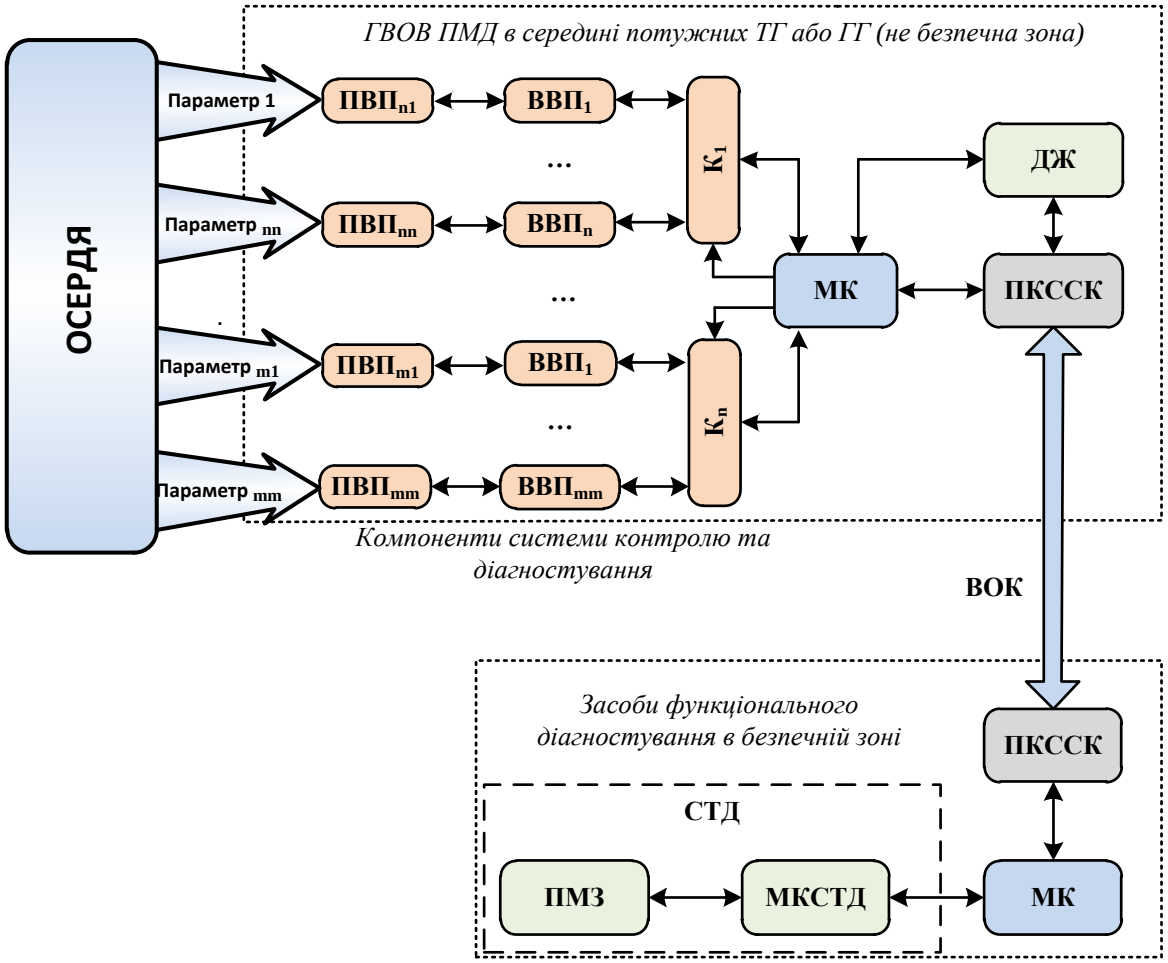
РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЗУСИЛЛЯ СТЯГУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА





1 – статор генератора,
2 – осердя ТГ,
3 – стяжна призма,
4 – пресувальна гайка,
5 – ємнісний сенсор ступеня пресування осердя ТГ.

УЗАГАЛЬНЕНА СТРУКТУРНА СХЕМА ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ СТАНУ СТИСНЕННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ



ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;
ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач;
К – комутатор;
МК - модуль мікроконтроллера керування роботою системи;
ДЖ – джерело живлення
ПКССК - перетворювач код-світло/світло-код;
МКСТД - модулю керування роботою системи технічної діагностики;
ПМЗ – програмно-метаматичні засоби;
СТД – система контролю та технічного діагностування;
ВОК – волоконно-оптичний кабель.

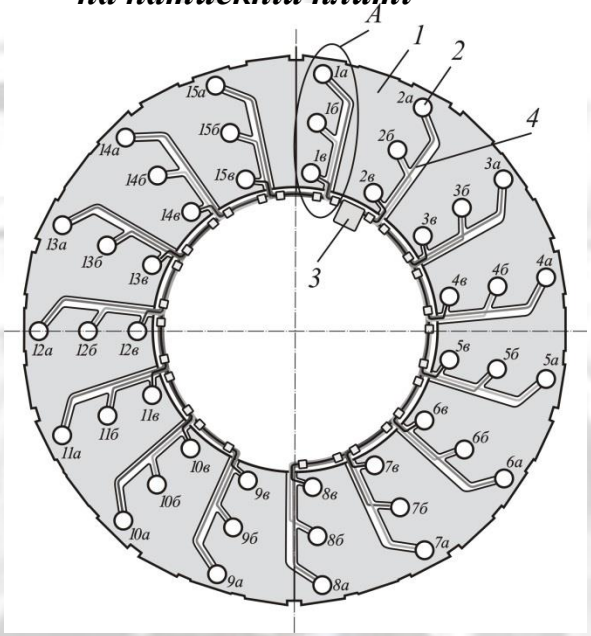
Гібридність полягає в поєднанні переваг волоконно-оптичних та мікроелектронних технологій в одній структурі.
Результат - отримання високої завадостійкості до впливу електромагнітних завад як сенсорів, так і ліній передачі сигналів, отримання високої завадостійкості до впливу електромагнітних завад як сенсорів, так і ліній передачі сигналів, простоту реалізації первинних перетворювачів інформаційних сигналів, а також дистанційність контролю стану стиснення осердя статора

ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ СТАНУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ

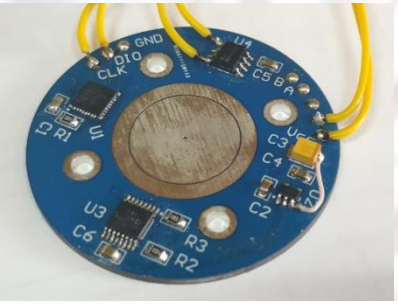
Стяжна призма

Натискна плита ***Осердя***

Розміщення вимірювальних комірок на натискній плиті



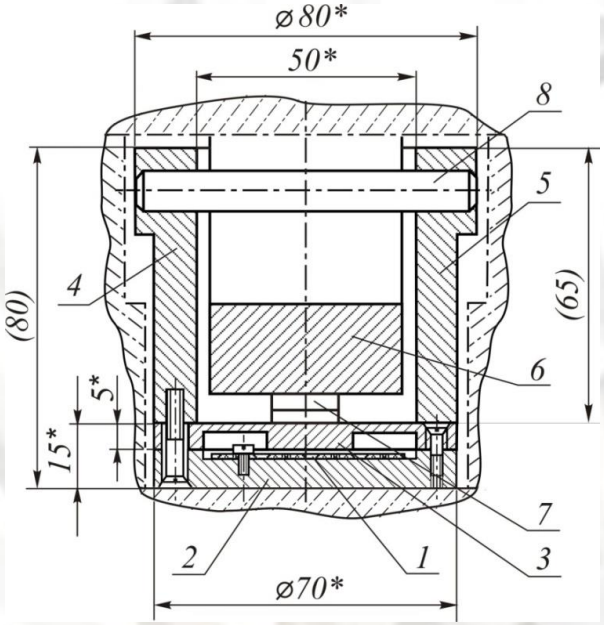
Вимірювальна комірка



Розроблено засоби контролю осердя статора потужного турбогенератора під час його виготовлення. В результаті контролю визначаються дефектні місця осердя з подальшим їх усуненням. Вимірювання питомого тиску пресування відбувається в N точках поперечного перерізу осердя. Для вимірювання тиску створено спеціальну вимірювальну комірку, до складу якої входить ємнісний сенсор та перетворювач ємність-код.

Комірка випробувана на ДП «Завод Електроважмаш» під час виготовлення осердя статора турбогенератора типу ТГВ-215-2ПТЗ.

СТВОРЕННЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ



Креслення вимірювальної комірки

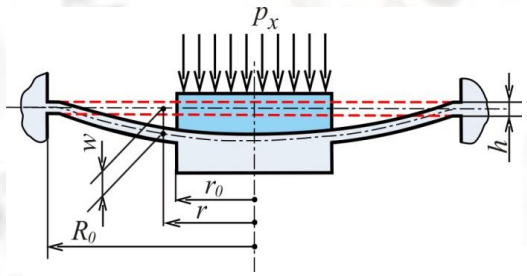
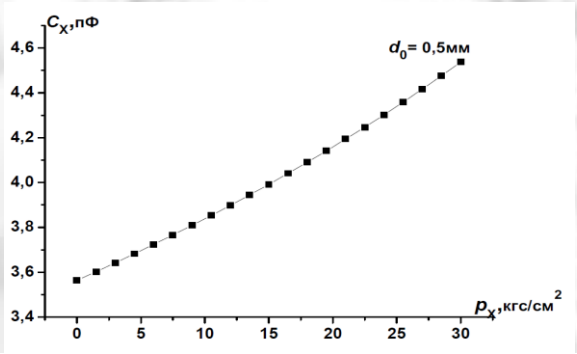
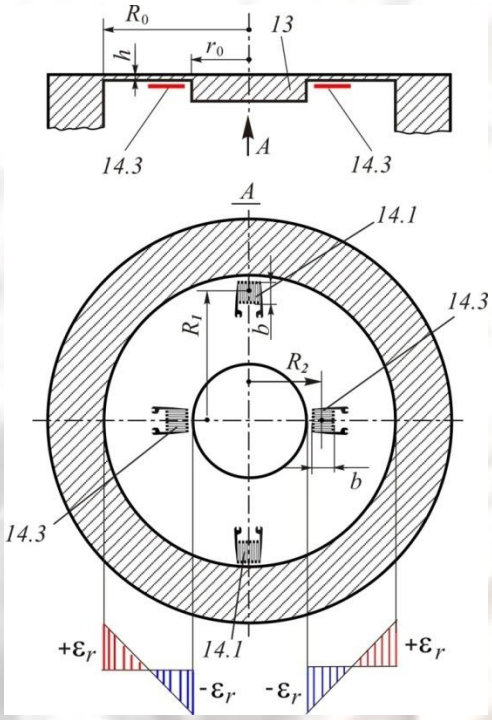


Схема розрахунку деформації мембрани



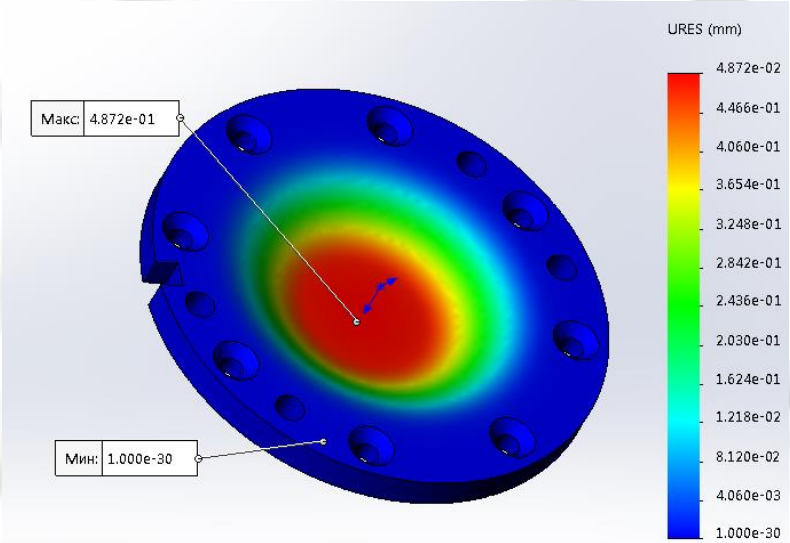
Залежність вихідної величини сенсору вимірювальної комірки від тиску (ємнісний сенсор)



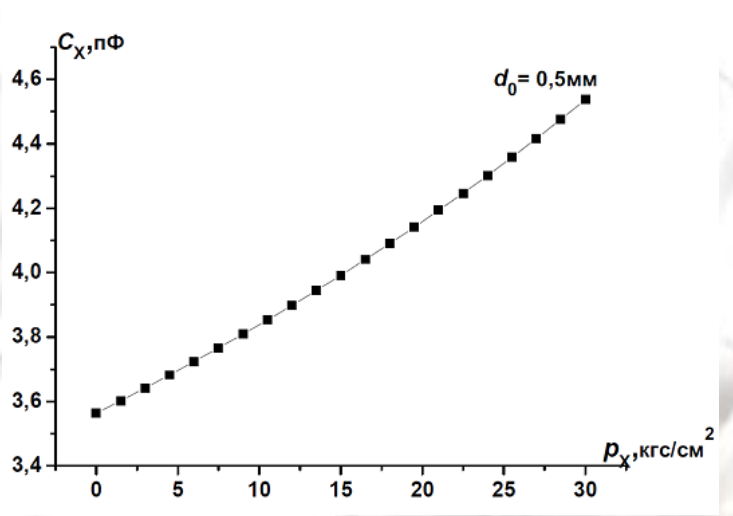
Епюри навантаження (тензорезестивний сенсор)

1 – ємнісний перетворювач тиску пресування, 2 – дно,
3 – металева мембрана з жорстким центром, 4 – стійка ліва,
5 – стійка права, 6 – пробка, 7 – проба, 8 – стержень

РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ СТУПЕНЮ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТГ



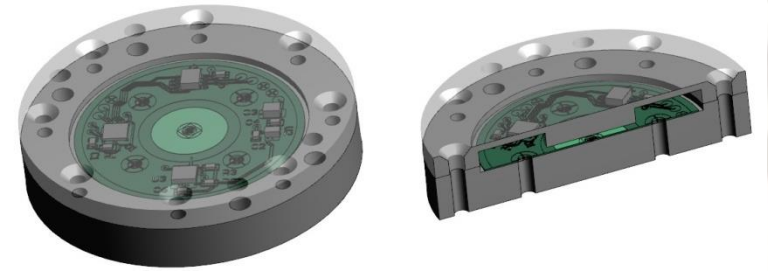
Вимірювальна мембрана



Графік функції перетворення

$$C_X = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d_0 - W_X} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_{\tilde{N}}^2}{4(d_0 - W_X)}$$

Дослідний зразок



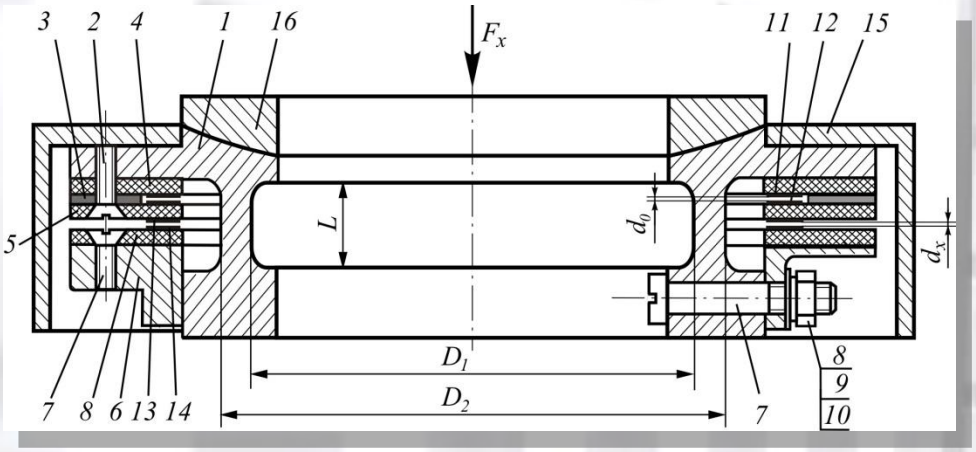
3D модель вимірювальної комірки з ємнісним сенсором

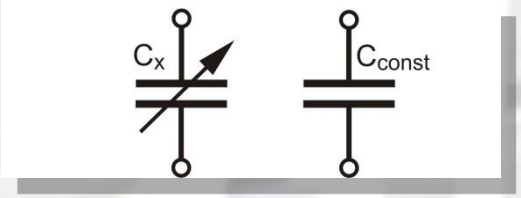
МЕХАНІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ СТАНУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТГ

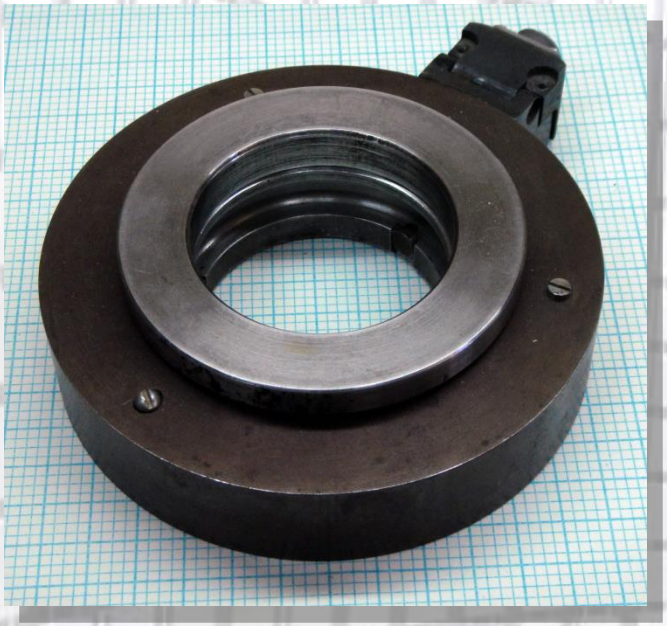
Силові акумулятори

Пружні елементи

ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ІЗ НАПІВДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ЕМНІСНИМ СЕНСОРОМ







Технічна характеристика диференціального сенсора:

1. **Діапазон вимірюваних зусиль в призмах, кгс – від 50 до44·102.**
2. **Роздільна здатність, кгс – 50.**
3. **Похибка вимірювання, % – 2.**
4. **Величина початкових зазорів в диференц. конденсаторах, мм – від 0,9 до1,0.**
5. **Зміна зазору в змінному конденсаторі при максимальному зусиллі, мкм – від 22 до 24.**
6. **Ємність постійного конденсатора, пФ – від 28 до 32.**
7. **Початкова ємність змінного конденсатора, пФ – від 28 до 32.**

СИЛОВИЙ АКУМУЛЯТОР СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТГ З ЄМНІСНИМ СЕНСОРОМ ХОДУ ТАРІЛЧАСТИХ ПРУЖИН

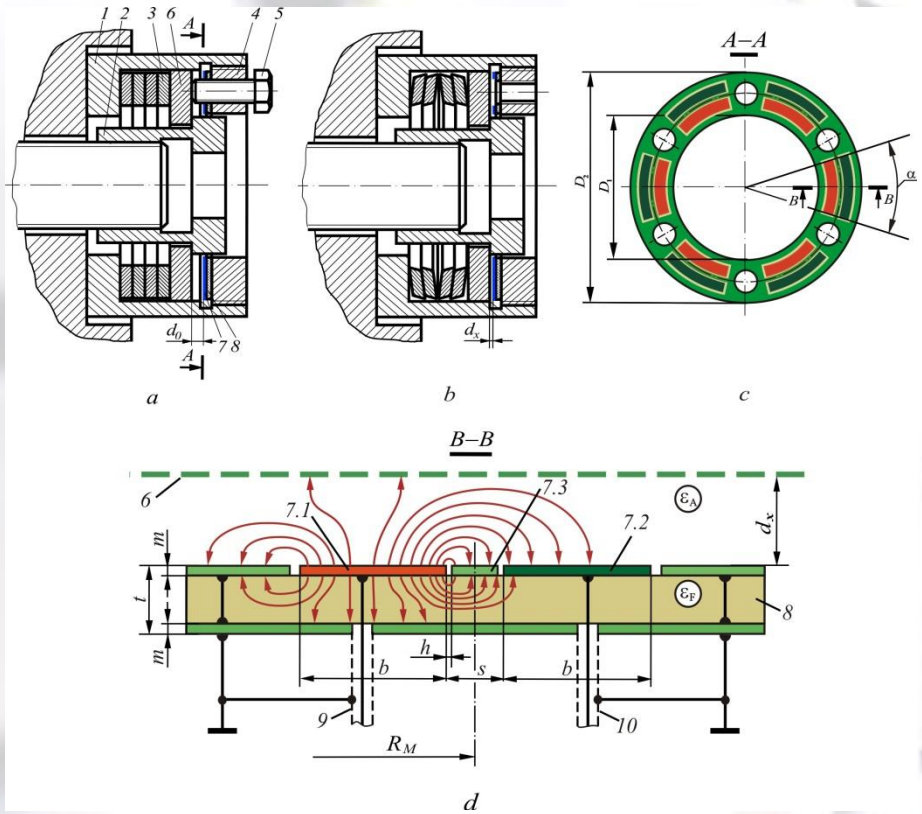
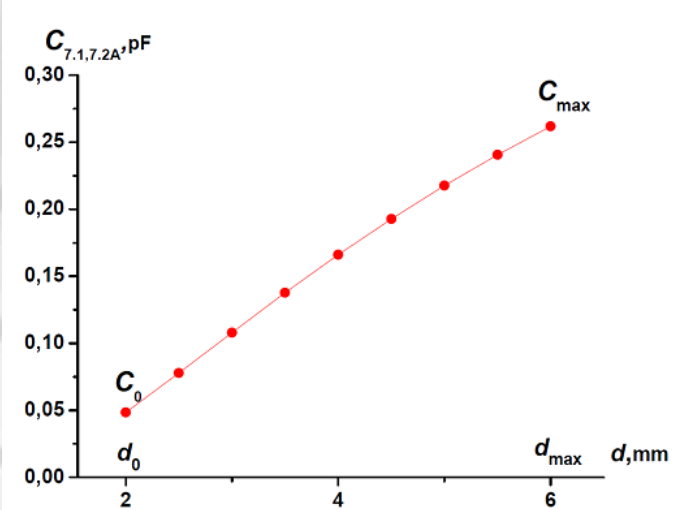


Схема сенсора



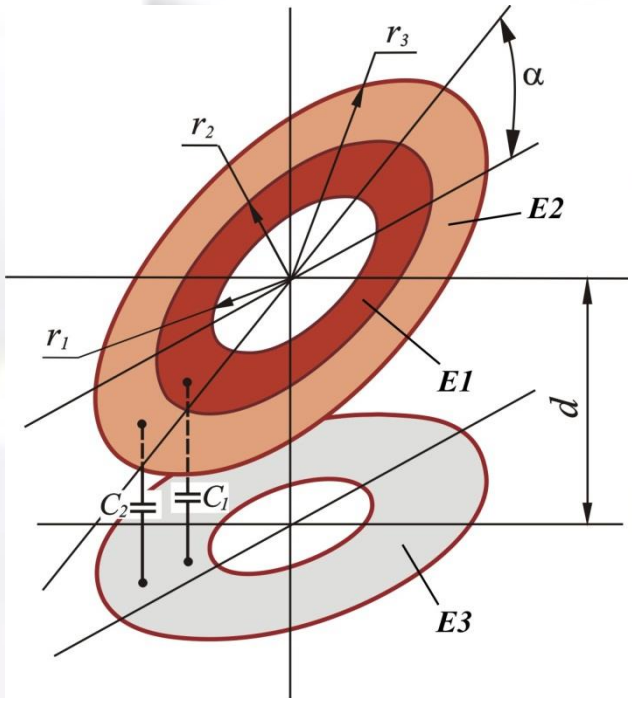
Графік аналітичної функції перетворення сенсора

$$C_{7.1,7.2A} = \varepsilon_0 \varepsilon_A \frac{\alpha_1}{\pi} N R_M \cdot \ln \frac{\left(\mathrm{th}\frac{\pi s}{4d_X} + \mathrm{th}\frac{\pi(s+2b)}{4d_X} \right)^2}{4\,\mathrm{th}\frac{\pi(s+2b)}{4d_X}\,\mathrm{th}\frac{\pi s}{4d_X}}$$

R_M– радіус середньої лінії розміщення електродів 7.2, 7.2 і 7.3
N - кількість елементарних ємнісних сенсорів

Патент України на винахід UA 120795 C2, G01B7/08, G01L1/06. Силовий акумулятор стабілізації тиску пресування статора турбогенератора / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кобзар К. О. – заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № a2018 03751; заявл. 06.04.2018; публ. 10.02.2020. – Бюл. № 3/2020.

ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА



Розташування електродів сенсора

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d}\frac{\sin\alpha}{\alpha}\left(r_3^2 - r_1^2\right)\left[1 + \frac{\sin^2\alpha}{4d^2}\left(\frac{r_3^4 - r_1^4}{r_3^2 - r_1^2}\right) + \frac{\sin^4\alpha}{8d^4}\left(\frac{r_3^6 - r_1^6}{r_3^2 - r_1^2}\right)\right]$$

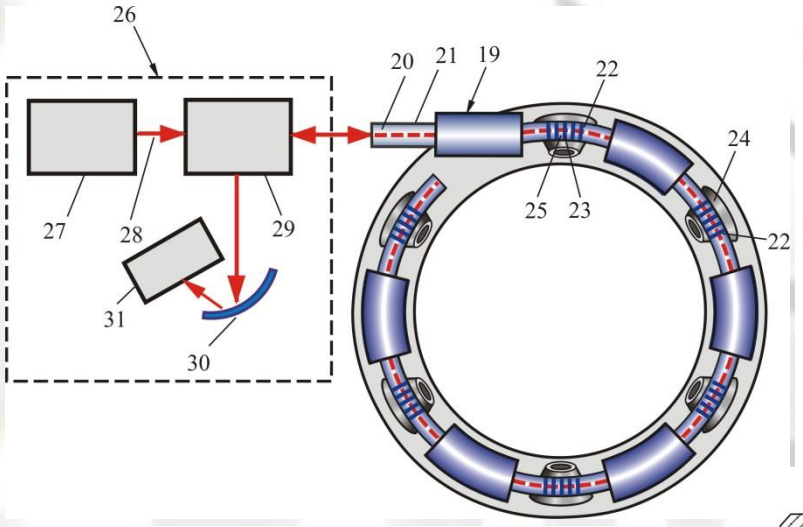
Значення похибок вимірювання скомпенсованого $\delta_к$ і нескомпенсованого $\delta_{нк}$ сенсорів

Коефіцієнт перекосу $k_п$	Похибка нескомпенсованого сенсора $\lvert\delta_{нк}\rvert$%	Похибка скомпенсованого сенсора $\lvert\delta_к\rvert$%	Ефективність $\left\lvert \delta_{нк}/\delta_к \right\rvert$
0,9	36	9,6	3,75
0,5	8,8	0,9	9,8
0,3	2,9	0,11	26,4
0,1	0,31	0,0015	209,3
0	0	0	–

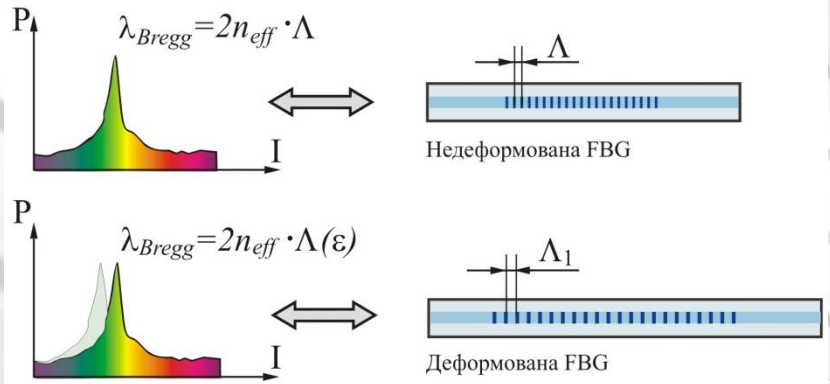
Удосконалено засоби контролю системи стабілізації тиску пресування осердя статора. Для ємнісних сенсорів вимірювачів зусиль в стяжних призмах осердя потужних турбогенераторів запропоновано метод корекції похибки, обумовленої перекосом електродів ємнісного сенсора, що дозволило забезпечити підвищення точності контролю стану пресування осердя статора на декілька порядків в реальному часі

Патент України на винахід UA 119101 C2, G01B7/08, G01L1/06. Ємнісний перетворювач зусиль в стяжних призмах осердя статора турбогенератора / Левицький А.С., Новік А.І., Зайцев Є.О. – заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № a2017 09154; заявл. 15.09.2017; публ. 25.04.2019. – Бюл. № 8/2019.

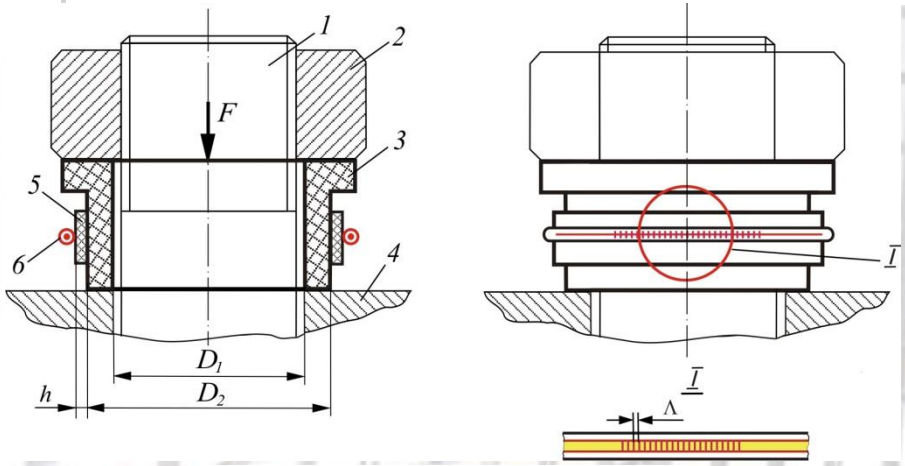
ОПТОВОЛОКОННА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТУПЕНЮ СТИСНЕННЯ АКТИВНОГО ЗАЛІЗА СТАТОРА



Блок-схема системи контролю



Деформація БР при вимірюванні мікропереміщень



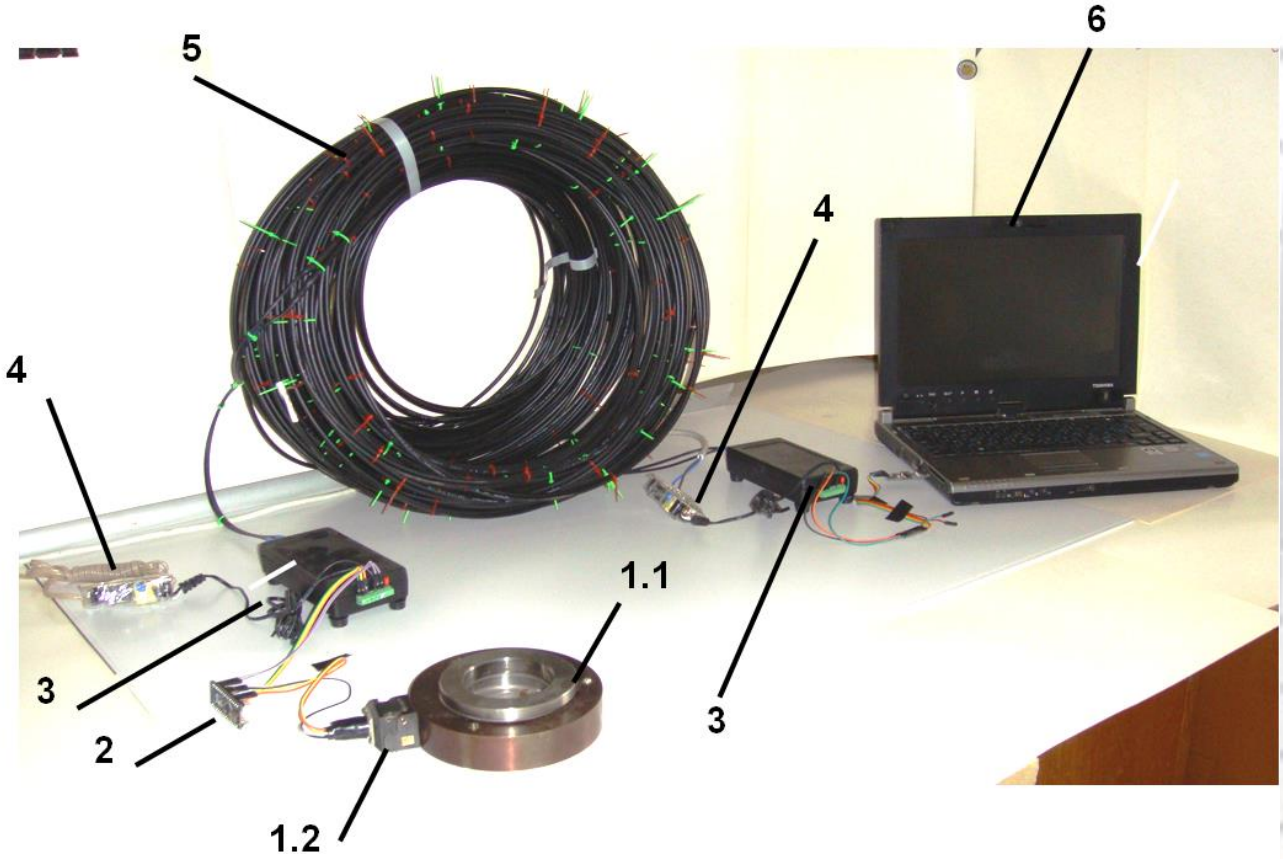
19 – оптоволокно;
20 – серцевина;
21 – захисна оболонка;
22 – Брегівська решітка(БР);
23 – секцій-перерізів з періодом Λ БР;
24 – пружний чутливий елемент;
25 – відстань між Брегівськими решітками в одному сенсорі;
26 – генератор оптичного сигналу;
27 – широкосмугове джерело світла;
28 – світловий пучок;
29 – оптичний відгалужувач;
30 – дисперсійний оптичний елементу;
31 – ПЗС фотоприймач;

ПЧЕ Брегівською решіткою

$$\Lambda' = \Lambda + \Delta\Lambda = \Lambda + \frac{8\nu_F\left(D_2+2h\right)}{N\left(D_2^2-D_1^2\right)}\cdot\frac{F}{E_F}$$

ν_F – коефіцієнта Пуасона
E_F– модуль пружності фіберглясу

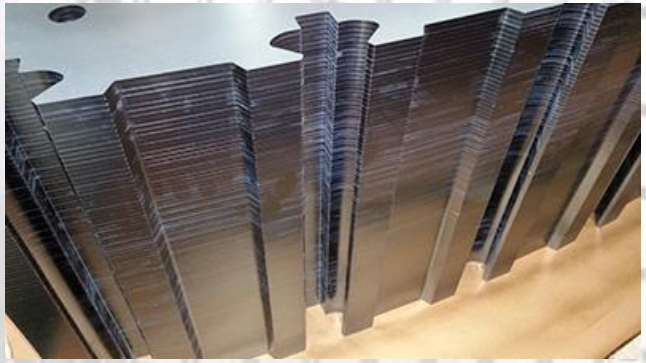
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗУСИЛЛЯ ПРЕСУВАННЯ ЗУСИЛЬ У СТЯЖНІЙ ПРИЗМІ ТГ ТГВ-200



1.1 – ємнісний сенсор зі спеціальним пружним трубчастим елементом;
1.2 – вимірювальний перетворювач ємність/код;
2 – мікроконтролер;
3 – перетворювач код/світло (світло/код);
4 – джерело живлення;
5 – волоконно-оптична лінія зв’язку;
6 – апаратно-програмні засоби вимірювальної інформації.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТГ

Збирання осердя статора під час виготовлення ТГ



Збирання торцевих пакетів осердя статора

Випробування та експлуатація

ПАТЕНТИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 120795

СИЛОВИЙ АКУМУЛЯТОР СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи **10.02.2020.**

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д.О. Романович

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 119101

ЕМНІСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЗУСИЛЬ В СТЯЖНИХ ПРИЗМАХ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

о відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи ні моделі".

тровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 2019.

ник Міністра економічного ку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 91534

ЛАЗЕРНИЙ ДАЛЕКОМІР

відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і моделі".

ровано в Державному реєстрі патентів України на корисні 10.07.2014.

Державної служби туальної власності України М.В. Ковіня

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Результати наукової праці впроваджено на Державному підприємстві «Завод Електроважмаш» (м. Харків, Україна) в системах контролю зусилля пресування осердя статора турбогенераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300 в процесі їх складання та експлуатації.

Запропоновані в роботі засоби контролю та діагностування стану спресованості осердя статора потужних турбогенераторів направлені на забезпечення безпечного та надійного функціонування потужних турбогенераторів електростанцій, що входять до складу ОЕС України в сучасних умовах відповідно до законодавства України та Енергетичного Співтовариства

Кількість публікацій за темою роботи: 43 публікації, в т.ч. 1 зарубіжна монографія, 21 стаття, із них 2 статті в іноземних виданнях з імпакт-фактором, 9 статей у наукових фахових виданнях, що включено до бази даних SCOPUS та Web of Science, 12 статей у наукових фахових виданнях.

Загальна кількість посилань на публікації авторів/ h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно:

Web of Science – 29/1,
Scopus– 17/3,
Google Scholar – 236/ 4 .

Отримано 2 патенти України на винахід та 1 патент України на корисну модель.