

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ТІТКО ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 621.313.322–81

МОДЕЛІ І МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЗАСОБИ  
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України, м. Київ

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,  
академік НАН України  
**Счастливий Геннадій Григорович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Кузьмін Віктор Володимирович**,  
Приватне акціонерне товариство «Міжрегіональна  
електроенергетична асоціація «ЕЛТА»,  
головний фахівець

кандидат технічних наук, доцент  
**Шевченко Валентина Володимирівна**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри електричних машин

Захист відбудеться 13 лютого 2014 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський  
політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий " 25 " грудня 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надійна експлуатація турбогенераторів є однією з основних складових енергобезпеки будь-якої країни. В процесі генерування електричної енергії в турбогенераторах виникають дефекти і пошкодження, які призводять до відмов у роботі. Зношування генеруючого обладнання, використання його в режимах, відмінних від номінального, є факторами зниження показників експлуатаційної надійності. При цьому економічні показники також погіршуються, зростають витрати на ремонтні відновлювальні роботи.

Одним із шляхів поліпшення техніко-економічних показників турбогенераторів є широке впровадження систем діагностики і прогнозування технічного стану на основі розроблених нових методів, перспективних способів і пристроїв.

В практиці експлуатації потужних турбогенераторів нагальною є задача збільшення об'єму діагностування для забезпечення надійності і зниження вартості ремонтів. На особливу увагу заслуговують методи інтегрального діагностування, а саме, методи вібраційної і електромагнітної діагностики, які реалізуються на основі засобів штатної системи контролю та потребують подальшого удосконалення. Тому доцільним є розвиток наукових основ і створення методик достовірного прогнозування залишкового ресурсу і часу до відмов турбогенераторів.

Таким чином, розробка моделей фізичних процесів при наявності дефектів, методик розрахунку залишкового ресурсу та діагностичних засобів підвищення показників надійності турбогенераторів, є актуальною і перспективною задачею, яка визначила напрям дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи проводились відповідно до наукових планів Інституту електродинаміки НАН України за темами, де здобувач був виконавцем окремих розділів: «Розробка наукових засад та технологій підвищення ефективності роботи енергетичних електромашин теплових і атомних електростанцій» («Елма» № ДР 0199U000569); «Моделювання процесів і розробка науково-технічних засобів реабілітації, експлуатації та створення енергоефективних електромашин» («Енергія – П» № ДР 0101U004421); «Розробка наукових основ, методів і засобів підвищення маневрених характеристик енергетичних електричних машин» («МАНЕЛМА» № ДР 0104U003220); «Розробити методи забезпечення і підвищення надійності та безпеки роторів потужних турбогенераторів» («РОТОР» № ДР 0105U002317); «Дослідження процесів електромеханічного перетворення енергії та розробка наукових основ енергоефективних електромашин з подовженим строком експлуатації» («ПЕРСПЕКТИВА» (К) № ДР 0102U005047); «Розробка методів забезпечення енергоефективної експлуатації електричних машин з подовженим ресурсом» («Енергоресурс» № ДР 0104U006434); «Розробка засобів підвищення енергоефективності різних типів електричних машин змінного струму та електромагнітних систем» («Енергоефективність» № ДР 0107U0042771) та наукових проектів: «Створення методів і системи вібродіагностики та визначення залишкового ресурсу вузлів турбогенераторів ТЕС при їх роботі в базових режимах» («РЕСУРС» № ДР

0110U004369); «Розробка методик визначення та контролю реального ресурсу екстремально навантажених елементів конструкцій енергетичного обладнання і обґрунтування технологій продовження строків його експлуатації в умовах вичерпності розрахункового ресурсу» (№ ДР 0103U008736, шифр 05.05.04/0049428 (5.5.10.Б). Самостійно виконано роботу за темою «Розробка моделей динамічного програмування та дослідження оптимальних стратегій модернізації і оновлення енергетичного обладнання ТЕС України» («Грант – 10» № ДР 0103U008738, Грант НАН України для молодих вчених).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка моделей фізичних процесів при наявності дефектів, методик розрахунку залишкового ресурсу та діагностичних засобів підвищення показників надійності турбогенераторів.

Для досягнення визначеної мети в роботі поставлені задачі:

- провести аналіз робіт, що пов'язані з існуючими способами підвищення характеристик надійності турбогенераторів та методами дослідження фізичних процесів в електричних машинах;

- розробити модель електромагнітних процесів в крайніх пакетах при наявності дефекту розпресування та розвинути перспективний електромагнітний спосіб діагностики стану пресування осердя статора турбогенераторів;

- виконати фізичне моделювання дефектів розпресування крайніх пакетів осердя статора турбогенераторів та експериментально отримати наукове обґрунтування чутливості запропонованих діагностичних параметрів;

- провести системний збір даних з експлуатаційної надійності і вібраційних процесів потужних турбогенераторів з достатньою для статистичного моделювання вибіркою в часі;

- розробити моделі і інтегральний спосіб діагностики турбогенераторів в експлуатації на основі аналізу вібраційних характеристик;

- розробити моделі і методики оцінки залишкового ресурсу турбогенераторів.

*Об'єктом дослідження* є процес генерування електроенергії потужними турбогенераторами, при роботі яких виникають відмови через пошкодження його вузлів.

*Предмет дослідження* – моделі фізичних процесів, засоби діагностики і прогнозування залишкового ресурсу турбогенераторів.

**Методи дослідження.** Розробка і наукове обґрунтування електромагнітного способу діагностики пресування осердя статора турбогенераторів виконано на основі математичного і фізичного моделювання магнітного поля при наявності дефектів. Розробка, дослідження і обґрунтування критерію граничного накопичення дефектів статора турбогенераторів та способу знаходження часу до відмови виконано методом статистичного та імітаційного моделювання. Розробка і дослідження методики визначення залишкового ресурсу турбогенераторів за критерієм економічної доцільності виконано на основі методів статистичного моделювання та динамічного програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Отримав подальший розвиток електромагнітний спосіб діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбогенераторів, який полягає в установленні для вимірювання ЕРС контурних датчиків у вигляді окремих витків періодично по колу так, що вони покривають всю поверхню листа осердя статора. Запропоновано низку діагностичних параметрів – діюче і амплітудне значення ЕРС, зсув їх фаз та постійну розкладу в ряд Фур'є, що дозволяє оцінювати навіть незначні локальні зміни стану пресування на всій боковій поверхні крайніх пакетів.

2. Побудовано багатофакторні статистичні моделі вібраційних процесів для турбогенераторів ТЕС України, що дозволяє досліджувати процеси в поточному часі при одному і тому ж навантаженні, для довільних режимів, до і після проведення ремонтів. В результаті досліджень отриманих моделей вперше сформульовано критерій граничного накопичення дефектів в статорі турбогенераторів та запропоновано новий спосіб вібродіагностики на основі аналізу вертикальних складових вібрацій на опорах підшипників ротора в навантажувальних режимах і режимах неробочого ходу, який дозволяє з великою достовірністю визначати критичний технічний стан статора, після якого настає відмова або аварія турбогенераторів (Пат. 57079 України, МПК Н02К 19/16).

3. Запропоновано перспективний метод визначення часу роботи турбогенераторів до відмови на основі динаміки зміни діагностичного параметра накопичення дефектів в статорі, який дозволяє вчасно виводити з експлуатації енергоблок і проводити ремонти турбогенераторів за фактичним станом.

4. Вперше розроблено математичну модель і спосіб визначення залишкового ресурсу турбогенераторів за економічною доцільністю на основі методів динамічного програмування для процесів генерування електричної енергії. Визначено функціональні рівняння і функціональні відображення техніко-економічних параметрів енергоблоків. Розроблено та реалізовано методику визначення залишкового ресурсу турбогенераторів на прикладі енергоблоків Криворізької ТЕС. Виявлено блоки, експлуатація яких є малоприбутковою.

**Практичне значення одержаних результатів** для електромашинобудування полягає в такому:

- розроблено методику діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбогенераторів на основі аналізу розподілу характеристик аксіальних складових магнітного поля всередині крайніх пакетів;

- результати досліджень вібраційних процесів турбогенераторів Трипільської, Ладизинської, Старобешівської, Бурштинської ТЕС до і після ремонтів, в тому числі після аварійних, дали можливість сформулювати критерій граничного накопичення дефектів статора, як оцінки реального технічного стану турбогенераторів;

- розроблено методику визначення часу до відмови турбогенераторів на основі результатів аналізу динаміки зміни параметра накопичення дефектів в статорі турбогенераторів для низки електростанцій України;

- розроблено методику і програмні засоби оцінки залишкового ресурсу турбогенераторів на основі визначення економічної доцільності експлуатації в заданий прогнозний термін з використанням методів динамічного програмування. Визначено

проблемні енергоблоки Криворізької ТЕС з точки зору економічної доцільності експлуатації.

Результати роботи впроваджено та використано:

- на Криворізькій ТЕС результати роботи використовуються при розробці рекомендацій відносно проведення планових ремонтів та умов експлуатації енергоблоків ТЕС, а також при визначенні ефективної політики модернізації та реконструкції ТЕС;

- на ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) результати роботи прийняті для впровадження при створенні нових типів турбогенераторів в частині діагностування стану пресування шихтованого осердя статора;

- в навчальному процесі кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (м. Київ).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові і практичні результати, які викладено в дисертації, одержано здобувачем особисто. Серед них: розробка математичної моделі електромагнітного поля в шихтованому осерді статора турбогенератора при наявності локального розпресування; розробка та дослідження статистичних моделей вібраційних процесів турбогенераторів; розробка методики визначення залишкового часу до відмови турбогенераторів на основі зміни параметра накопичення дефектів в статорі турбогенераторів; розробка критеріальної функції граничного накопичення і наукове обґрунтування способу безперервного контролю технічного стану статора турбогенератора; розробка моделі, методики і засобів оцінки залишкового ресурсу турбогенераторів на основі визначення економічної доцільності експлуатації в заданий прогностичний термін з використанням методів динамічного програмування

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних конференціях: «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA 2001) (м. Харків, 2001 р.), «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Вінниця, 2012р.), «Методи і засоби досліджень, діагностики і усунення вібрації турбоагрегатів і допоміжного обертового обладнання» (с. Славське, 2012 р.), а також на семінарах «Актуальні проблеми розвитку енергетичного електромашинобудування» та «Електромеханічні та теплові процеси у високовикористовуваних електричних машинах» Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики» НАН України (м. Київ, 2005 – 2013 рр.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, з них 7 – у фахових наукових виданнях України, 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг роботи становить 163 сторінки, у тому числі 48 рисунків та 18 таблиць по тексту, з них 3 таблиці та 4 рисунки на 7 окремих сторінках, список використаних джерел із 137 найменувань на 15 сторінках, 2 додатки на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, її зв'язок з науковими планами і темами, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, наведено перелік використаних методів дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення, наведено дані щодо апробації та публікацій результатів досліджень.

**У першому розділі** проведено аналіз сучасного стану в електроенергетиці, який показує, що проблеми, такі як коливання споживання електроенергії, підвищення напруги в мережах, динамічні коливання при експлуатації, прискорюють зношування турбогенераторів (ТГ) і зменшують показники надійності. З огляду численних публікацій пошкоджуваність ТГ, які працюють в маневрених режимах, зростає в 2–4 рази. Зростають експлуатаційні витрати. До цього також призводить і робота ТГ в режимах споживання реактивної потужності та в асинхронних режимах.

Засоби діагностики, що застосовуються на електростанціях, які підвищують економічні показники і показники надійності, потребують подальшого удосконалення. Тому є потреба в розробці нових ефективних, економічних та технологічних при впровадженні способів і засобів діагностики. Перспективним питанням є діагностування технічного стану шихтованого магнітопроводу ТГ, його механічного і вібраційного стану.

Відзначимо, що для забезпечення високих показників надійності велике значення має використання при експлуатації ТГ достовірних засобів визначення часу до аварійних ситуацій і відмов обладнання. На підставі аналізу науково-технічної літератури щодо застосування методик прогнозування залишкового ресурсу зроблено висновок про доцільність подальшого розвитку методичних засобів прогнозування технічного стану та визначення часу до відмов ТГ.

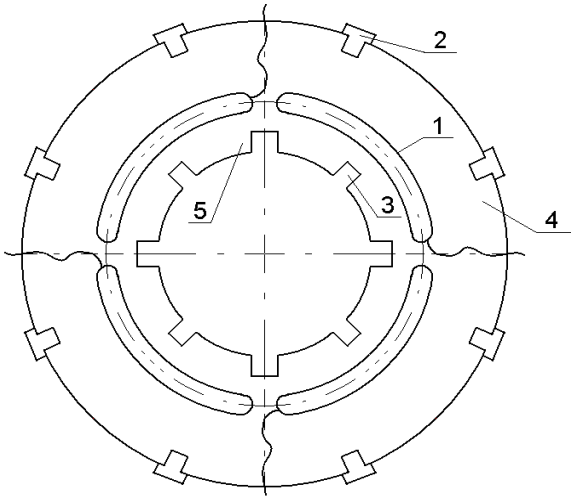
Систематизація інформації з публікацій щодо існуючої методологічної основи побудови систем діагностування і прогнозування, в тому числі для оцінки ресурсу і керування процесом технічного обслуговування електрогенеруючого обладнання показує, що наразі існує достатня методологічна основа для розробки перспективних систем діагностики і прогнозування технічного стану турбогенераторів на основі поєднання детермінованих і стохастичних методів.

**Другий розділ** присвячено розробці способу діагностування для підвищення експлуатаційної надійності турбогенераторів. Відома проблема розпресування і локального розпушування шихтованого осердя статора ТГ під час його роботи, особливо при наборі і скиданні навантаження. Це призводить до підвищення вібрацій та багатьох інших дефектів. Існуючі і відомі методи діагностування розпресування осердя статора складні при застосуванні, або вимагають встановлення багатьох датчиків.

Запропоновано і досліджено електромагнітний спосіб ідентифікації розпресування осердя статора, який полягає в тому, що по колу встановлюються витки у вигляді дуг в кількості більшій, за кількість полюсів ( $n \geq 2p$ ), які охоплюють всю поверхню осердя, замість локальних датчиків, яких треба встановлювати велику кількість. На рис. 1 для двополусної машини показано чотири витки. Розміри витка та їх кількість визначається місцем встановлення таким чином, щоб наведена у витках

ЕРС могла апаратно контролюватись і складала декілька Вольт. Діагностування проводиться на основі аналізу вимірюваних ЕРС.

Спосіб науково обґрунтовано на основі розроблених математичних моделей розрахунку характеристик магнітного поля при наявності дефектів розпресування і розпушування.



- 1 – вимірюючі дугоподібні витки;
- 2 – стягуючі призми; 3 – пази;
- 4 – спинка магнітопроводу статора;
- 5 – зубцева зона магнітопроводу

Рисунок 1 – Схема установки дугоподібних витків ( $n = 4$ ) для вимірювання аксіальної складової індукції магнітного поля в шихтованому осердді статора турбогенератора

$$A(x, t) = A_0 \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}, \quad (1)$$

де  $A_0$  – амплітудне значення,  $\omega$  – частота,  $\tau$  – полюсний крок.

Таким чином, це плоскопаралельне поле, яке характеризується векторами  $\vec{E}(0, 0, E_z)$  і  $\vec{H}(H_x, H_y, 0)$ .

Для описання процесу розпресування крайніх пакетів введено тензор магнітної проникності

$$\vec{\mu} = \begin{vmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{vmatrix}.$$

Із системи рівнянь Максвелла отримано рівняння відносно нормальної складової напруженості магнітного поля  $H_y$ . Для області III (рис. 2) таке рівняння матиме вигляд

Для дослідження характеристик електромагнітного поля при розпресуванні осердя статора ТГ розроблено математичну модель: в шихтованому крайньому пакеті статора (рис. 2, область III), товщиною  $h_2$ , який при розпресуванні збільшує свої розміри і збільшується віддаль між окремими листами, визначаються характеристики електромагнітного поля. Области I, II, IV – повітряні проміжки, область V – шихтоване осердя. В площині  $y = h_1$  знаходиться нескінченно тонкий шар із біжучою густиною струму, який моделює лобову частину обмотки статора генератора, що збуджує електромагнітне поле. Лінійна густина струму

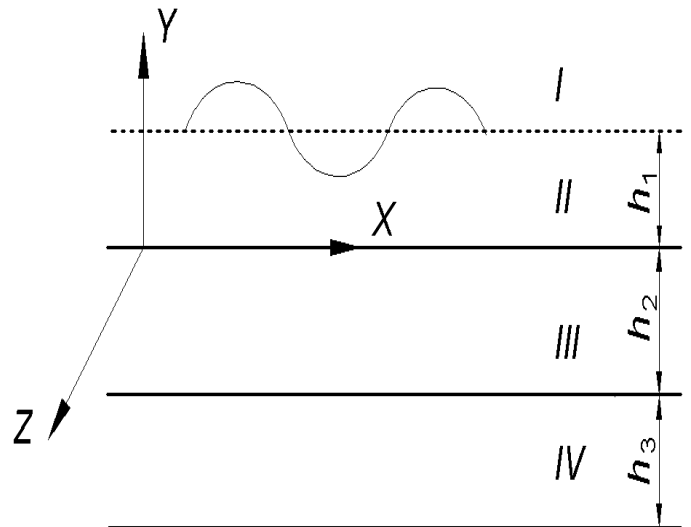


Рисунок 2 – модель для розрахунку електромагнітного поля в крайніх листах розпресованого осердя статора ТГ



$$\frac{\mu_x}{\mu_y} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} - j\omega \mu_x \sigma H_y = 0, \quad (2)$$

де  $\mu_x, \mu_y, \sigma$  – магнітна проникність в напрямках  $0x, 0y$  і електропровідність середовищ відповідно.

Складова  $H_x$  знаходиться з рівняння  $\operatorname{div} B = 0$ . Вектори, що характеризують магнітне поле, від координати  $x$  залежать як лінійна густина струму  $A(x, t)$ . Сталі розв'язку рівняння (2) в кожній із підобластей визначаються з граничних умов на межі переходу середовищ, де складові  $H_x$  та  $B_y$  неперервні. Складова  $H_x$  при переході через площину  $y = h_1$  змінює своє значення на лінійну густина струму  $A$ .

На основі запропонованої моделі виконано якісний аналіз фізичних факторів, що призводять до зміни нормальної складової індукції магнітного поля. Показано, що в результаті розпресування вихровий струм листа пакетів зменшується, а отже зменшується і реакція вихрового струму. Тому нормальна складова індукції магнітного поля збільшується на поверхні пакета. Окрім того, при розпресуванні поверхня крайнього пакета наближається до шару струму, що також збільшує дану складову. Це явище використано при діагностуванні осердя статора турбогенераторів.

Запропонований спосіб діагностики шихтованого магнітопроводу дає можливість визначати низку діагностичних параметрів.

Найбільш простим параметром є діюче значення ЕРС, що наводиться в різних витках. Якщо в одному із витків ЕРС відрізняється від ЕРС, наведених в інших, то це означає, що в місці установки даного витка спостерігається порушення якості пресування магнітопроводу.

Другим діагностичним параметром є постійна розкладу в ряд Фур'є. Показана висока чутливість цього діагностичного параметра до зміни стану пресування.

В результаті досліджень запропоновано ряд інших діагностичних ознак – зсув фаз ЕРС, амплітудне значення ЕРС в датчиках, які теж досить чутливі до розпушування.

Даний спосіб є технологічним для застосування. Таким чином можна контролювати наявність нерівномірності затягування стягуючих призм, відкручування гайок, відгин окремих натискних пальців, локальне розпушування листів осердь, повне розпресування шихтованого осердя статора.

Запропонований спосіб діагностування на основі застосування контурних витків досліджувався на масштабній фізичній моделі турбогенератора 500 МВт, створеній раніше в ІЕД НАНУ.

Основним вузлом моделі є трифазна обмотка статора, шихтований магнітопровід, скріплений болтами, нерухомий магнітопровід ротора для моделювання повітряного проміжку, натискні пальці. Фізична модель живиться від автономного джерела в складі двох генераторів постійного та змінного струму, які приводяться до обертання електродвигунами змінного і постійного струму. Джерело живлення дозволяє змінювати частоту та струм в обмотці статора. У фізичній моделі, як і в натурному генераторі, створюється обертове магнітне поле. Експерименти проводились при струмі 100 А в обмотці статора та постійній частоті 425 Гц.

Виготовлено первинні інформаційні датчики у вигляді чотирьох витків, встановлених на двох сегментах і зсунутих по колу на 90 градусів. Кожен виток приклеєно до осердя статора по контуру спинки статора. При цьому використано мідний провід ПЛШО 0,1мм. Щоб не пошкодити виток при установці сегментів, по контуру витка наклеєні вставки з пресшпану товщиною 0,5 мм. Вивідні кінці кожного з датчиків скручено в біфіляри. Для вимірювання

Таблиця 1 – Діючі значення  $E$  кривої ЕРС в датчиках при різних станах пресування шихтованого магнітопроводу

№ варіанту експерименту	№ датчика	$E$ , мВ
I	1	31
	2	28
	3	27
	4	27
II	1	32
	2	30
	3	35
	4	29
III	1	48
	2	50
	3	47
	4	46
IV	1	48
	2	48
	3	44
	4	44
V	1	29
	2	30
	3	43
	4	34

ЕРС в кожному з витків використовувались: для вимірювання діючих значень – вольтметр універсальний цифровий В7–35; миттєвих значень – цифровий осцилограф D–S5102C та інформаційно-вимірювальний комплекс на основі комп'ютера і аналогово-цифрового пристрою, що дало змогу підтвердити достовірність результатів вимірювань. Значення ЕРС при різних засобах вимірювань відрізнялись один від одного не більше, ніж на 5 %. Похибка вимірювання цифровим осцилографом не перевищувала 2 %.

Розпресування моделювалось повним ослабленням затягування всіх гайок, локальне розпушування – ослабленням гайок, які розташовано навпроти одного з витків, або вийманням окремих натискних пальців. Контролювання зусиль затягування гайок здійснювалось за допомогою динамометричного ключа. Нормальний стан пресування магнітопроводу вважався при затягуванні в 50 Н·м.

Приведемо узагальнену інформацію про результати досліджень для п'яти варіантів стану пресування магнітопроводу: I варіант – умовно нормальний стан пресування;

II варіант – ослаблено зусилля затягування гайок стягувальних призм в області III датчика; III варіант – ослаблено зусилля затягування всіх гайок; IV варіант – знято декілька натискних пальців в області навпроти датчика № 3 і при відсутності зусиль затягування всіх гайок; IV та V варіанти – при однакових вихідних зусиллях затягування всіх гайок.

В табл. 1 наведено результати досліджень на фізичній моделі для одного діагностичного параметра, для діючого значення ЕРС, які підтвердили ефективність даного способу. Параметр суттєво реагує на розпресування (III та IV варіанти) магнітопроводу, в т.ч. на локальне розпушування (II, IV, V варіанти).

Отже, дані експериментів підтверджують отримані результати математичного моделювання та ефективність запропонованого способу діагностування стану пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

Спосіб технологічний при застосуванні на практиці, економічний для впровадження, а його використання не лише запобігає появі ряду дефектів статора, які призводять до відмов генератора, а і буде давати можливість визначати, які режими найбільш небезпечні з точки зору суттєвих відхилень від оптимальних зусиль пресування осердя статора, в т.ч. рівномірних по колу.

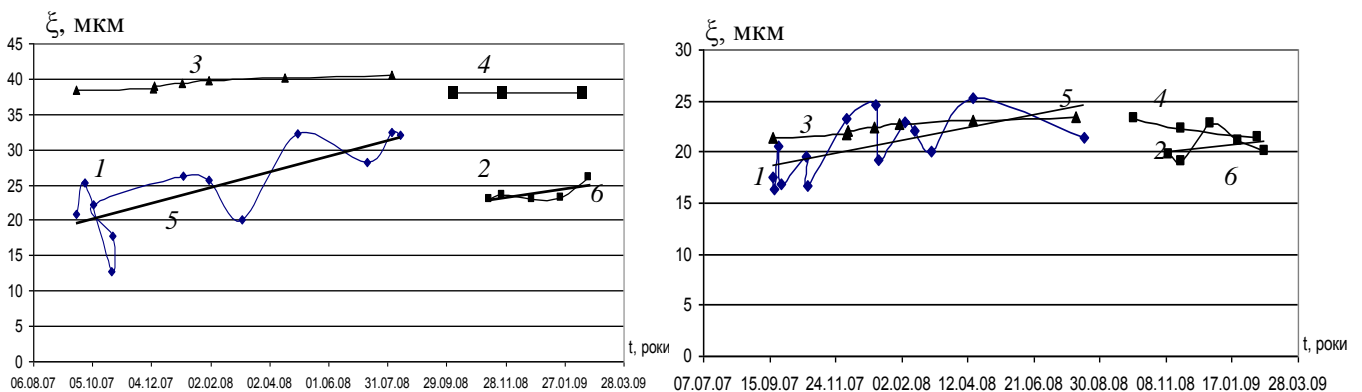
У третьому розділі наведено комплекс досліджень вібраційних процесів і запропоновано спосіб безперервного контролю технічного стану статора турбогенератора.

Вібраційні процеси інтегрально і локально досить достовірно визначають стан ТГ. Вібраційні процеси в ТГ, в основному, контролюються за штатними датчиками, встановленими на підшипниках, які досить чутливі до дефектів в роторі і менш чутливі до дефектів в статорі. Тому запропоновано спосіб діагностики ТГ, який дозволяє за штатними вібродатчиками розпізнавати дефекти статора ТГ, тобто підвищити чутливість штатних вібродатчиків до дефектів статора.

Досліджено вібраційні характеристики ТГ для великого масиву статистичних даних по вібраціях, режимах, дефектах. Глибина «передісторії» сягає 10 – 20 років. Тому що вібрації реєструються при різних навантаженнях, то спочатку будувались статистичні моделі, які мають такий вигляд

$$\xi = f(t, P, Q, \cos \varphi), \quad (3)$$

де  $\xi$  – параметр вібропроцесів,  $t$  – час,  $P$  і  $Q$  – активна та реактивна потужності відповідно,  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.



а – блок № 3

б – блок № 5

1, 2 – залежності, які побудовано за статистичними даними в часі віброзсувів на 6 підшипнику турбогенератора в режимі навантаження до і після ремонту ( $P_a = 280$  МВт); 3, 4 – регресійні залежності в часі віброзсувів в режимі неробочого ходу до і після ремонту для 6 підшипнику турбогенератора; 5, 6 – регресійні залежності в часі віброзсувів в режимі навантаження до і після ремонту для 6 підшипнику турбогенератора.

Рисунок 3 – Залежності в часі віброзсувів для турбогенератора ТГВ–300 Трипільської ТЕС

Побудовано статистичні моделі і проведено дослідження для ТГ таких станцій як Трипільська, Ладижинська, Старобешівська, Бурштинська ТЕС. Основну увагу

приділено вивченню характеру протікання вібраційних процесів до і після ремонтів, при різних режимах експлуатації, при наявності дефектів в статорі і роторі окремо. Це дозволило визначити основні закономірності вібраційних процесів (рис. 3).

Криві залежностей в часі віброзсувів ТГВ–300 Трипільської ТЕС визначаються характерним явищем. До ремонту – зростають (криві 1, 3, 5), після – знижуються (криві 2, 4, 6).

Характер розрахункових залежностей віброзсувів на опорах підшипників з боку турбіни й збудника від режимів і в часі близький, а значить на показання вібродатчиків, які встановлено у даних місцях, в основному впливає технічний стан турбогенератора. Це підтверджується аналізом залежностей, побудованих для вібрацій на підшипниках турбіни.

Якщо порівнювати тенденції зміни вібрацій у часі для різних блоків, то відзначимо, що ці тенденції мають схожий характер.

Довірчі інтервали отриманих залежностей можуть бути досить значними у зв'язку з малою вибіркою статистичних даних. Інтервал же відхилень всіх побудованих залежностей (для різних блоків, потужностей, діапазону часу і т. ін.) від точок виміру не перевищує 20 %, що показує на визначену детермінованість показань датчиків вібрацій, які встановлено на опорах турбогенератора, тобто, ці дані перебувають у значимій кореляції з технічним станом ТГ, а випадкова складова впливає менш значимо.

На основі аналізу сформульовано критерій граничного накопичення дефектів статора турбогенератора. Для цього введено критеріальну функцію накопичення дефектів статора ТГ та діагностичний параметр  $K$ , який відповідає значенню критеріальної функції при певному стані ТГ

$$K = f(A_{xx}, A_{кр}, A_{нагр}). \quad (4)$$

Дослідження поведінки віброхарактеристик турбогенераторів до і після ремонтів, дали можливість уточнити його до такого вигляду

$$K = \frac{A_{xx}}{A_{нагр}} \left( \frac{A_{кр} - A_{нагр}}{A_{нагр}} \right), \quad (5)$$

де  $A_{xx}$  – вертикальна складова амплітуди вібрації при неробочому ході (мкм, мм/с);  $A_{нагр}$  – вертикальна складова амплітуди вібрації при активному максимальному навантаженні або близькому до нього ( $> 0,66P_{ном}$ ) (мкм, мм/с);  $A_{кр}$  – граничне значення амплітуди вібрації, вище якої експлуатація турбогенератора не допускається.

Значення  $A_{кр}$  приймаються, виходячи з вимог Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж для турбогенераторів, які працюють при 3000 об/хв:  $7,1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  (65 мкм); при 1500 об/хв:  $7,1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  (130 мкм).

Критерій граничного накопичення дефектів статора турбогенератора має вигляд:

$$\begin{aligned} K > A & \text{ – умовно бездефектний статор турбогенератора;} \\ B < K < A & \text{ – відбувається процес накопичення дефектів;} \\ K < B & \text{ – турбогенератор близький до відмови,} \end{aligned} \quad (6)$$

де  $A$  і  $B$  – сталі величини.

В результаті досліджень для майже половини ТГ ТЕС України знайдено такі значення сталих критерію граничного накопичення дефектів статора ТГ:

$$A = 1; B = 0,7. \quad (7)$$

Таблиця 2 – Приклади діагностування ушкодження статора турбогенераторів за запропонованим діагностичним параметром  $K$  й існуючим на ТЕС нормативним параметром

$K = \frac{A_{xx}}{A_{нагр}} \left( \frac{A_{кр} - A_{нагр}}{A_{нагр}} \right)$ $A_{кр} = 65$	$A_{нагр}$ , мкм	Відмови на ТЕС через ушкодження обмотки статора	$A_{нагр} < 30$ мкм	30 – 65 мкм	100 мкм
0,24	34	Трипільська ТЕС (блок № 5)	Робота без обме- жень	Приймаються заходи по зниженню ві- брації	Спрацьо- вує захист
0,65	31	Бурштинська ТЕС (блок № 5)			
0,85	26	Виведений в ремонт блок № 6 на Три- пільській ТЕС			

Те, що вище приведений критерій більш адекватно характеризує стан статора ТГ, ніж нормативні параметри, показують результати досліджень (табл. 2). Існуючі методи контролю вібрацій не змогли визначити появу небезпечних дефектів, що призвело до відмов. В той же час запропонований критерій завжди вказував на необхідність зупинки енергоблоку значно раніше до відмови.

У всіх досліджених турбогенераторів ТЕС і ТЕЦ, які працювали без відмов в розглянутий проміжок часу,  $K > 1$ , а для ТГ, що відмовили  $K < 0,7$ .

**В четвертому розділі** запропоновано два підходи до розв'язання задачі визначення часу до відмови ТГ і оцінки залишкового ресурсу.

Аналіз статистичних моделей вібраційних процесів в міжремонтний період для ТГ ряду електростанцій показав, що з часом параметр  $K$  (критеріальна функція) зменшується і перед відмовами ТГ стає менше 0,7. Це явище використано для визначення часу до відмов ТГ. Видно, що методика визначення часу до відмов ТГ за трендом параметра  $K$  в міжремонтний період з великою достовірністю прогнозує час відмови генератора (табл. 3, рис. 4).

Спостерігається також тенденція в динаміці зниження надійності статорів турбогенераторів не лише в міжремонтний період, але й у процесі тривалої експлуатації (рис. 4).

Дослідження на великому масиві статистичних даних енергоблоків ТЕС України показали, що застосування в практиці діагностування розробленої методики дозволить майже повністю виключити аварійні ситуації та відмови генераторів з великими об'ємами відновлювальних робіт, а це значно зменшить витрати на ремонти.

Таблиця 3 – Значення параметра  $K$  до і після ремонтів на Трипільській ТЕС ТГВ–300

№ блока	$K$ після ремонту	$K$ перед ремонтом	Швидкість зниження $K$ за 1 рік	Пошкодження в статорі турбогенераторів
1	2,04	0,8	0,25	Ослаблення клинів кріплення статора до деталей корпусу – 6-8 шт. Знижена щільність заклинювання пазових клинів.
3	1,88	0,18	0,34	10% зварних швів, які лопнули. Розпушування в зубцевій зоні на глибину 50 мм. Ослаблення пазових клинів.
6	2,25	0,65	0,4	Фретінг-корозія. Руйнування лакового покриття листів осердя статора. Ослаблення пазових клинів. Ослаблення стяжних призм – 6 шт.
середнє по блоках	2,1	0,9	0,24	По 8 капітальних ремонтів блоків.

Алгоритм прогнозування відмов турбогенераторів за динамікою критеріальної функції накопичення дефектів статора реалізується послідовно за етапами:

1. Періодично (5 – 6 разів на рік) вимірюються і реєструються вертикальні складові віброзсувів на опорах підшипників ротора турбогенератора. Одночасно реєструються дані щодо режиму ( $P$ ,  $Q$ ,  $\cos \varphi$ ) та часу реєстрації. Реєстрація (контроль)

виконується в одному із навантажувальних режимів ( $P > 0,7 \cdot P_{\text{ном}}$ ) та режимі неробочого ходу.

2. За даними «передісторії» будуються статистичні моделі вібраційних процесів. Моделі постійно уточнюються при нових реєстраціях.

3. Здійснюється нормалізація (приведення до номінального режиму) параметрів контролю.

4. Розраховується значення критеріальної функції для кожної часової точки контролю. Значення віброхарактеристик в режимі неробочого ходу вибирається виміряне, найближче до часу чергового контролю в навантажувальному режимі.

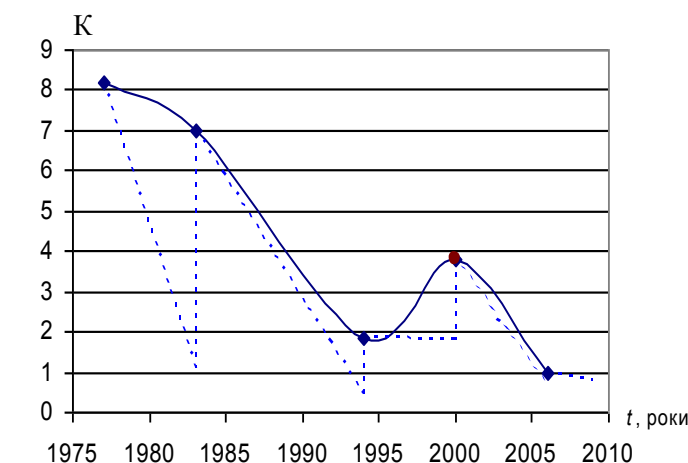


Рисунок 4 – Динаміка зміни параметра  $K$  у часі після капітальних ремонтів (блок № 9 Старобешівської ТЕС) (---- – в міжремонтні періоди експлуатації)

5. Формується критерій граничного накопичення дефектів статора. При неприпустимості подальшої експлуатації за критерієм інформація надається відповід-

ним службам. Якщо критерій вказує на можливість подальшої експлуатації, будеться за трендом значень критеріальної функції крива прогнозу з довірчим інтервалом. За цією кривою визначається мінімальний і максимальний час виникнення відмови ТГ, тобто час, через який прогнозна крива критеріальної функції досягне граничного значення допустимої роботи.

Для оцінки залишкового ресурсу ТГ за економічною доцільністю подальшої експлуатації запропоновано математичну модель оптимізації техніко-економічних показників при генеруванні електричної енергії і методику на основі методів динамічного прогнозування, започаткованих Р. Белманом.

Сутність задачі стосовно енергетичного обладнання полягає у знаходженні часу для вибраного енергоблока, коли його треба замінити на новий або провести модернізацію чи ремонт, щоб прибуток від експлуатації енергоблока був максимальним протягом певного прогнозного часу – 2, 5, 10 років. У загальному вигляді функціональне рівняння оптимальної політики заміни обладнання методами динамічного програмування виглядають так

$$\Pi_n(t) = \max \begin{bmatrix} P^3 : D_n(0) - Z_n(0) - C_n(t) + \Pi_{n+1}(1) \\ P^c : D_n(t) - Z_n(t) + \Pi_{n+1}(t+1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де  $n = N, \dots, 1$ . Тут  $D_n(t)$  – дохід від експлуатації енергоблока в році  $n$ , який вироблено в  $(n-t)$ -ий рік, вік якого  $t$  років;  $Z_n(t)$  – витрати на утримання енергоблока в році  $n$ , який вироблено в  $(n-t)$ -ий рік, вік якого  $t$  років;  $\Pi_{n+1}(t+1)$  – сумарний прибуток, отриманий у рік  $(n+1)$  та за період після нього, рахуючи від кінця процесу, від енергоблока віку  $(t+1)$  років;  $D_n(0)$ ,  $Z_n(0)$  – відповідно дохід і витрати на утримання нового енергоблока, який вироблено в  $n$ -ий рік, вік якого 0 років;  $C_n(t)$  – вартість заміни енергоблоку за рік  $n$ , який вироблено в  $(n-t)$ -ий рік, вік якого  $t$  років;  $\Pi_{n+1}(1)$  – сумарний прибуток, отриманий у рік  $(n+1)$  та за період після нього від енергоблока віком 1 рік. Нижній рядок визначає прибуток при збереженні енергоблоку, а верхній – при його заміні.  $\Pi_n(t)$  – величина сумарного прибутку за рік  $n$  від експлуатації енергоблоку віку  $t$  і за період після цього року при оптимальній політиці заміни в період, що залишився. Час  $t$  змінюється від 1 до  $t_0$ . Метод динамічного програмування передбачає часовий відрізок прогнозу розбивати на  $N$  етапів. Кожний етап буде відповідати одному року. При цьому кількість розбивань  $N$  дорівнює  $t_0$ .

Тому, що кількість розбивок  $N$  дорівнює  $t_0$ , розрахунок сумарного прибутку  $\Pi_n(t)$  може бути виконаний при зміні  $n$  від  $t_0$  до 1, при цьому буде отримано функцію  $\Pi_1(t)$ , яка є оптимальним прибутком процесу заміни, що почався у перший рік. Політику заміни, що забезпечує максимальний прибуток, можна побачити з розгляду процесу максимізації відповідно до виразу (8).

Техніко-економічні параметри, дохід, витрати на утримання і заміну представляємо у вигляді:

$$\begin{aligned} D_n(t) &= [M(1+B \cdot n(1 - e^{-g(n-t)}))] e^{-st}, \\ Z_n(t) &= K(e^{-z(n-1)} + L(1 - e^{-wt})), \\ C(t) &= T(1 - ke^{-vt}), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $M, B, K, L$  – сталі величини, що визначають дохід і витрати на утримання у різні роки виробництва і при різних термінах служби. Показники  $g, s, z, w$  – визначають швидкість збільшення або зменшення величин  $D_n(t)$  і  $Z_n(t)$  при зміні  $n$  і  $t$ . Вартість нових поліпшених енергоблоків може згодом збільшуватися чи зменшуватися. Тому можна припустити, що вона не залежить від року виготовлення енергоблока, і представити її залежною тільки від терміну служби енергоблока. Тому  $T$  і  $k$  – сталі величини, що визначають вартість заміни обладнання, а показник  $v$  – швидкість зміни величини  $C(t)$ .

Однак для розв'язання задачі про заміну декількох енергоблоків при можливих переходах (замінах) одного до іншого функціональне рівняння (8) вимагає деяких змін. Тому запропоновано функціональні рівняння для розв'язання задачі оптимальної заміни обладнання при можливості великої кількості замін у такому вигляді

$$P_n(t) = \max_{j=1, \dots, m} \begin{bmatrix} P_{ij}^3 : D_n(0) - Z_n(0) - C_n(t) + \Pi_{n+1}(1) \\ P_i^c : D_n(t) - Z_n(t) + \Pi_{n+1}(t+1) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

для кожного  $i = 1, \dots, m$ .  $P_{ij}^3$  – рішення про заміну кожного  $j$ -го енергоблока на кожний  $i$ -ий, а  $P_i^c$  – рішення про збереження  $i$ -го енергоблока (тобто рішення про продовження роботи на вже заміненому  $i$ -ом енергоблоці),  $j, i = 1, \dots, m$  ( $m$  – це кількість енергоблоків, що беруть участь у процесі заміни). При  $j = i$   $P_{ij}^3$  – це рішення про заміну спочатку вихідного енергоблоку на  $i$ -ий, а згодом про заміну цього енергоблока, що проробив якийсь час, знову на такий же новий.

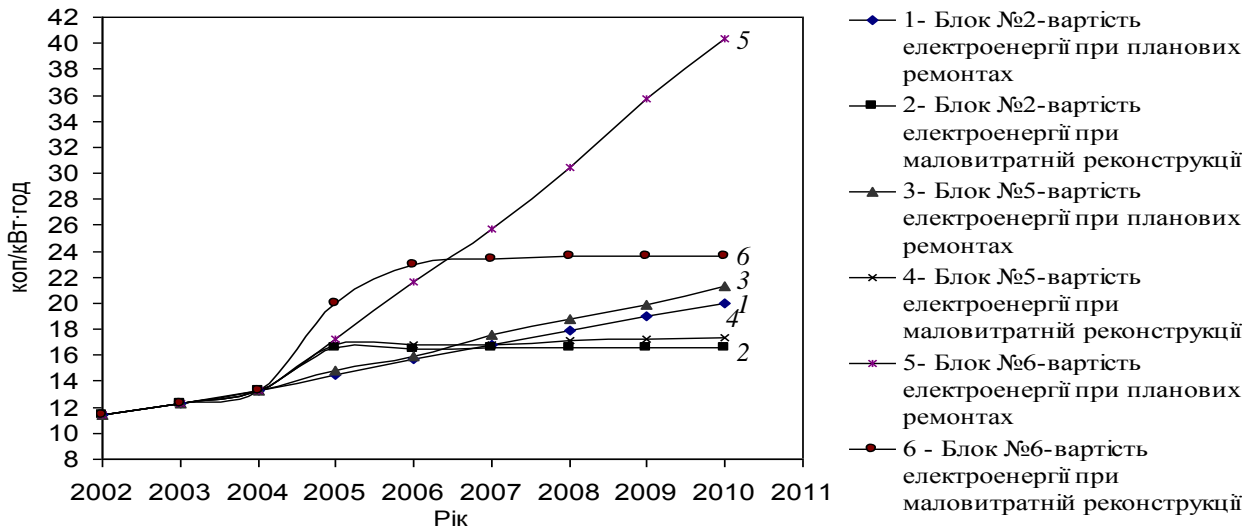


Рисунок 5 – Розрахункова динаміка тарифу на електроенергію при планових ремонтах і маловитратній реконструкції для забезпечення сталого прибутку для 3-х блоків Криворізької ТЕС

Функція  $\Pi_n(t)$  розраховується стільки разів, скільки існує замін вихідного енергоблока. Використовуючи розроблену методику і програмні засоби на основі зібраної «передісторії» досліджено прогнозні техніко-економічні характеристики шести



блоків Криворізької ТЕС. Важливим практичним результатом досліджень є визначення серед шести блоків тих із них, які недоцільно експлуатувати за умови безупинного зростання прибутку (рис. 5). Крива 5 на рис. 5 показує, що найбільш непридатним до експлуатації є блок № 6 Криворізької ТЕС.

На прикладі енергоблоків Криворізької ТЕС показано, що розроблену методику пошуку оптимальної політики модернізації блоків доцільно використовувати для визначення ресурсу енергетичного обладнання, а саме часу, коли енергоблоки небажано експлуатувати з точки зору економічної доцільності.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-практичне завдання розробки моделей фізичних процесів при наявності дефектів, методик розрахунку залишкового ресурсу та діагностичних засобів підвищення показників надійності турбогенераторів.

При цьому отримано наукові і практичні результати:

1. Аналіз стану електрогенеруючого обладнання показує на доцільність суттєвої модернізації і оновлення на інноваційній основі. Успішна експлуатація в сучасних умовах енергосистем вирішується створенням нових типів генераторів з розширеними функціональними можливостями та високими показниками надійності. Для забезпечення таких показників велике значення має використання при експлуатації турбогенераторів достовірних засобів діагностики та прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Перспективними є інтегральні методи електромагнітної і вібраційної діагностики.

2. Запропоновано спосіб електромагнітної діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбогенераторів на основі використання дугових датчиків, які встановлюються в крайніх пакетах осердя статора. Спосіб досліджено на фізичній моделі турбогенератора, в якій виконано моделювання дефектів розпресування осердя статора, та на основі розробленої математичної моделі електромагнітного поля в крайніх пакетах при наявності дефекту у вигляді розпресування. Окрім амплітудного і діючого значень ЕРС, наведених у датчиках, виявлено нові діагностичні параметри, такі як різниця амплітудних значень і зсув фаз вектора індукції в сусідніх контурах, постійна розкладу в ряд Фур'є кривих ЕРС. Результати досліджень підтвердили високу чутливість діагностичних параметрів та достовірність способу діагностики як при розпресуванні, так і при локальному розпушуванні. Спосіб ефективний і економічний при практичному використанні.

3. На основі досліджень побудованих статистичних моделей розроблено спосіб безперервного контролю технічного стану статора турбогенератора, який полягає в тому, що за показаннями вібродатчиків, встановленими на опорах підшипників, визначається діагностичний параметр як функція від вертикальної складової віброхарактеристики при неробочому ході і вертикальної складової віброхарактеристики в режимах навантаження і порівнюється з гранично припустимим значенням цього параметра. Введено критеріальну функцію, яка характеризує накопичення де-

фектів в статорі, та сформульовано критерій граничного накопичення дефектів, коли настає відмова турбогенераторів. Дослідження для ряду ТЕС України показали, що введений параметр накопичення дефектів в статорі є більш достовірний для контролю технічного стану, аніж значення вібрацій. Досить часто відмови турбогенераторів траплялися при нормальному рівні вібрації, при цьому параметр накопичення дефектів знаходився за межею граничного накопичення.

4. Запропоновано спосіб і методику визначення часу до відмови турбогенераторів за тенденцією зміни критеріальної функції накопичення дефектів в статорі турбогенераторів. Достовірність методики підтверджено результатами досліджень «передісторії» турбогенераторів для ряду ТЕС. Значення критеріальної функції зменшується не лише між ремонтами, а й в процесі всієї експлуатації турбогенераторів.

5. Розроблено математичну модель оптимізації техніко-економічних показників при генеруванні електричної енергії, методику і програмні засоби визначення залишкового ресурсу турбогенераторів за економічною доцільністю подальшої експлуатації енергетичного обладнання, яке певний час працює з моменту введення його в експлуатацію або з моменту реабілітації цього обладнання на основі методів динамічного програмування. Створено базу даних з техніко-економічних показників і проведено дослідження економічної ефективності процесів генерування окремими блоками Криворізької ТЕС. Виявлено ряд проблемних блоків, залишковий ресурс яких з позиції економічної доцільності мінімальний.

6. Результати роботи використовуються при розробці рекомендацій відносно проведення планових ремонтів і умов експлуатації та при визначенні ефективної політики модернізації та реконструкції енергоблоків Криворізької ТЕС. На ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) прийняті для впровадження при створенні нових типів турбогенераторів в частині діагностування стану пресування шихтованого осердя статора та застосовані в навчальному процесі кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (м. Київ).

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Титко В.А. Методика решения задач поиска оптимальной стратегии модернизации, замены и ремонта оборудования в электроэнергетике / В.А. Титко // *Технічна електродинаміка*. – 2001. – № 4. – С. 45 – 50.

2. Титко В.А. Расчет электромагнитного поля в шихтованном магнитопроводе электромашины при наличии локальной распрессовки / Г.В. Томашов, В.А. Титко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2001. – № 16. – С. 155 – 157. *Здобувачем розроблено модель електромагнітного поля в шихтованому осерді статора турбогенератора при наявності локального розпресування.*

3. Титко В.А. Влияние темпов инновационного развития энергомашиностроения на оптимальную политику обновления электростанций / В.А. Титко // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – 2003. – № 2 (5). – С. 101 – 105.

4. Тітко В.О. Питання оптимальної політики модернізації, заміни та реабілітації енергетичного обладнання / В.О.Тітко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2005. – № 2 (11). – Ч.1. – С. 21 – 22.

5. Тітко В.О. Визначення економічної доцільності експлуатації енергоблоків ТЕС на основі методів динамічного програмування / В.О. Тітко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2007. – № 2 (17). – С. 3 – 8.

6. Тітко В.О. Статистичні моделі вібраційних процесів для діагностики турбо- і гідрогенераторів / В.О. Тітко // Гідроенергетика України. – 2011. – № 3 – 4. – С. 43 – 45.

7. Тітко В.О. Техніко-економічні аспекти застосування синхронно-асинхронної структури електрогенеруючих потужностей в енергосистемі України / В.О. Тітко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 85 – 86.

8. Пат. 57079 України, МПК Н02К 19/16. Спосіб безперервного контролю технічного стану статора генератора / Тітко О.І., Ахременко В.Л., Тітко В.О. – №200101675; заявл. 15.07.2010; опубл. 10.02.2011. – Бюл. № 3. *Здобувачем розроблено критеріальну функцію граничного накопичення і науково обґрунтовано спосіб безперервного контролю технічного стану статора генератора.*

9. Тітко В.А. Оценка состояния статора турбогенератора по показаниям штатных вибродатчиков / А.И. Титко, В.Л. Ахременко, В.А. Титко // Энергетика та електрифікація. – 2011. – № 1 (329). – С. 36 – 40. *Здобувачем розроблено та досліджено статистичні моделі вібраційних процесів турбогенераторів.*

10. Тітко В.О. Прогнозування часу до відмови турбогенераторів за результатами вібродіагностики / О.І. Тітко, В.Л. Ахременко, В.О. Тітко // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 6 (346) . – С. 57 – 60. *Здобувачем розроблено методику визначення залишкового часу до відмови турбогенераторів на основі зміни параметра накопичення дефектів в статорі.*

11. Тітко В.А. Оценка технического состояния и остаточного ресурса турбогенераторов по результатам штатных виброизмерений / В.Л. Ахременко, В.А. Крамарский, В.А. Титко // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 8 (348). – С. 35 – 38. *Здобувачем проведено дослідження ефективності методики визначення залишкового часу до відмов турбогенераторів на основі моделювання «передісторії» експлуатації машин на ТЕС України.*

12. Тітко В.О. Створення методів і системи вібродіагностики та визначення залишкового ресурсу вузлів турбогенераторів ТЕС при їх роботі в базових режимах (проект 5.5.2) / О.І. Тітко, М.В. Мислович, В.Л. Ахременко, В.М. Зварич, Л.Б. Остапчук, Р.М. Сисак, В.О. Тітко, Ю.І. Гижко // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. – С. 262 – 269. *Здобувачем проведено дослідження методів визначення залишкового ресурсу вузлів турбогенераторів ТЕС України при їх роботі в базових режимах.*

## АНОТАЦІЇ

**Тітко В.О. Моделі і методики розрахунку характеристик та засоби підвищення надійності турбогенераторів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання розробки моделей фізичних процесів при наявності дефектів, методик розрахунку залишкового ресурсу та діагностичних засобів підвищення показників надійності турбогенераторів.

Запропоновано спосіб електромагнітної діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбогенератора на основі використання дугових датчиків, які встановлюються в крайніх пакетах осердя статора. Спосіб дозволяє запропонувати ряд діагностичних параметрів, визначати зміни пресування в локальних місцях по всій поверхні торцевої зони статора турбогенератора при незначній кількості встановлених датчиків.

Побудовано і досліджено статистичні моделі вібраційних процесів в потужних турбогенераторах для ряду теплових електростанцій України. На основі результатів досліджень запропоновано діагностичний параметр функціональної вібродіагностики та сформульовано критерій граничного накопичення дефектів в статорі турбогенератора, який дозволяє вчасно зупинити генератор, не доводячи до аварійної ситуації.

Для оцінки залишкового ресурсу і визначення часу до відмови турбогенератора в роботі запропоновано два підходи.

На основі тенденції зміни параметра накопичення дефектів в статорі турбогенератора в міжремонтний період експлуатації розроблено методику визначення часу до відмови турбогенератора, яка з великою достовірністю прогнозує час відмови генератора.

Для оцінки залишкового ресурсу турбогенераторів за економічною доцільністю подальшої експлуатації на основі методів динамічного програмування розроблено принципово нову модель, методику і програмні засоби.

*Ключові слова:* турбогенератор, методи діагностики і прогнозу, надійність, економічність, підвищений ресурс, критерій граничного накопичення дефектів, статистичні моделі, електромагнітні і вібраційні процеси.

**Титко В.А. Модели и методики расчета характеристик и средства повышения надежности турбогенераторов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена разработке моделей физических процессов при наличии дефектов, методик расчета остаточного ресурса и диагностических средств повышения показателей надежности турбогенераторов.

В работе проведен анализ состояния в электроэнергетике, который показывает на существующие проблемы морального и физического износа генерирующего оборудования. Старое изношенное оборудование приводит к необходимости эффективных ремонтов, а стоимость их с каждым годом возрастает. Чаше возникают отказы турбогенераторов, их показатели надежности уменьшаются.

Техническое состояние существующего электрогенерирующего оборудования и проблемы современной энергосистемы требуют разработки эффективных систем обеспечения, в частности систем диагностики и прогноза на основе построения математических и статистических моделей процессов для обеспечения высоких показателей надежности при работе в режимах, в которых нуждается энергосистема.

Разработаны математические модели для расчета магнитного поля в крайних пакетах при наличии локальной распушовки и распрессовки. Исследования показали, что контроль параметров, характеристик процессов деформации электромагнитного поля при распрессовке является эффективным средством для идентификации данного дефекта.

На этой основе предложен перспективный способ электромагнитной диагностики состояния прессовки шихтованного сердечника статора ТГ, с использованием дуговых датчиков, которые устанавливаются в крайних пакетах. Способ эффективный и экономичный при практическом использовании, позволяет при незначительном количестве установленных датчиков контролировать степень прессовки магнитопровода статора по всей боковой поверхности.

Построены и исследованы статистические модели вибрационных процессов в турбогенераторах для ряда тепловых электростанций Украины. Выявлены новые особенности зависимости процессов от параметров режимов, во времени, до и после ремонтов. На основе результатов исследований статистических моделей предложен новый диагностический параметр  $K$  функциональной вибродиагностики и впервые сформулирован критерий граничного накопления дефектов в статоре ТГ, который позволяет своевременно останавливать генератор, не доводя до аварийной ситуации. Анализ отказов, произошедших ранее на отдельных энергоблоках, показал, что использование данного критерия позволило бы исключить данные отказы.

Предложено два подхода к решению задачи определения времени до отказа ТГ и оценки остаточного ресурса.

На основе тенденции изменения параметра накопления дефектов в статоре турбогенератора в межремонтный период разработана методика определения времени до отказа ТГ. Достоверность методики подтверждена результатами исследований «предыстории» турбогенераторов для ряда ТЭС. Остаточное время до отказа турбогенераторов определялось по статистическим данным параметра накопления дефектов статора.

Для оценки остаточного ресурса ТГ за экономической целесообразностью дальнейшей эксплуатации на основе методов динамического программирования, впервые разработана модель, методика и программные средства. На основе статистических данных «предыстории» проведены исследования шести блоков Кривоужской ТЭС для определения целесообразности эксплуатации при условии непре-

рывного роста прибыли. Определены блоки, для которых рост прибыли невозможен без радикальных реабилитационных мероприятий.

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры электромеханики Национального технического университета «КПИ» (г. Киев) и на Криворожской ТЭС при разработке рекомендаций относительно проведения плановых ремонтов и условий эксплуатации энергоблоков ТЭС, а также при определении эффективной политики модернизации и реконструкции ТЭС. На ДП «Завод «Электротяжмаш» (г. Харьков) результаты работы приняты для внедрения при создании новых типов турбогенераторов в части диагностирования состояния прессовки шихтованного сердечника статора электрических машин.

*Ключевые слова:* турбогенератор, методы диагностики и прогноза, надежность, экономичность, повышенный ресурс, критерий граничного накопления дефектов, статистические модели, электромагнитные и вибрационные процессы.

**Titko V.O. Models and Methods of Calculation of Characteristics and Means of Improving the Reliability of the Turbogenerators.** – Manuscript.

A thesis for candidate degree of technical sciences in specialty 05.09.01 - electrical machines and apparatus. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2013.

Dissertational work is devoted to development of models physical processes at presence of defects, design procedures of a residual resource and diagnostic means for increase of parameters of reliability in turbogenerators.

Proposed the method of electromagnetic diagnostics of the state of pressing laminated stator core of the turbogenerators on the basis of the use of arc sensors, which are installed in extreme packages stator core. The method allows to offer a number of diagnostic parameters, to determine the changes pressing in local areas across the surface of the end zone stator with small amount of installed sensors.

Are constructed and investigated statistical models of vibration processes in powerful turbogenerators for a number of thermal power plants in Ukraine. Based on the results of the research proposed diagnostic parameter D of functional vibrodiagnostics and the criterion of limit accumulation of the defects in the stator, which allows in time to stop the generator, without leading up to the emergency situation.

For estimation of residual resource and determining the time to failure turbogenerators, proposed two approaches.

On the basis of tendencies of change of the parameter of defect accumulation in the stator of the turbogenerator in the between-repairs period of operation is developed a method of determining the time prior to a failure of the turbogenerator, which to reliably predicts the time of a failure of the generator.

For estimation of residual resource of turbogenerators for economic feasibility of further operation on the basis of methods of dynamic programming developed a fundamentally new model, methodology and software tools.

*Keywords:* turbogenerator, methods of diagnostics and forecast, reliability, profitability, raised resource, criterion of boundary accumulation of defects, statistical models, electromagnetic and vibrating processes.



Підписано до друку 20. 12. 2013 р. формат 60x84/16  
Папір офсетний. умовно-друк. аркушів 0.89  
Обл.-вид. аркуш 0.73. тираж 100 замов. 133.  
Відділ оперативної поліграфії ІЕД НАН України  
03680, Київ -57, проспект Перемоги, 56.