

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**КРАСНІКОВ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 539:534

**КОЛИВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ  
СИСТЕМ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВА  
З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОСТІ ПАРАМЕТРІВ**

Спеціальність 05.02.09 – Динаміка та міцність машин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Жовдак Валерій Алексійович,**  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри динаміка та міцність машин.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Симоновський Віталій Іович,**  
Сумський державний аграрний університет, професор кафедри проектування технічних систем;

кандидат технічних наук, доцент

**Шатохін Володимир Михайлович,**  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри теоретичної механіки.

**Провідна установа:** Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; м.Харків.

Захист відбудеться “18” червня 2003 року о 16<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе,21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий ”15” травня 2003 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Бортовой В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні турбоустановки є високонавантаженими об'єктами, що працюють в умовах інтенсивного динамічного і теплового впливу. Незважаючи на ці умови експлуатації, до турбоустановок пред'являються підвищені вимоги до рівнів вібрацій, величин залишкових деформацій, тріщиностійкості і безпеки всієї конструкції в цілому. У теперішній час більш 75 % вітчизняних турбоагрегатів виробили свій проектний ресурс і знаходяться в експлуатації більше 25 років. Тривала експлуатація систем турбоагрегат-фундамент-основа (ТФО) привела до формування цілого комплексу факторів, що безпосередньо впливають на надійність цих конструкцій. До їхнього числа можна віднести взаємодію фундаменту з основою і внутрішні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в матеріалі фундаменту. Незважаючи на багаторічну будівельну практику, великий обсяг накопиченого експериментального матеріалу і значні теоретичні розробки, питання, пов'язані з взаємодією споруд з основою і деградацією властивостей залізобетонних фундаментів, залишаються одними з найбільш складних і недостатньо вивчених. Особливо гостро зазначені проблеми виникають при модернізації системи ТФО, пов'язаної з заміною старої турбіни, що виробила свій ресурс, на нову (з більшим к.к.д., потужністю) та установкою її на старий фундамент.

Приведені обставини вказують на актуальність вирішення проблеми, пов'язаної з прогнозом вібраційного стану і надійності турбоагрегатів з урахуванням випадкової зміни характеру взаємодії фундаменту з основою і фізико-механічних характеристик матеріалу фундаменту при тривалій його експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до розділів науково-дослідних робіт за 1997-1999 рр. “Розробка методів теоретичного та експериментального дослідження динаміки, міцності, надійності складних, в тому числі адаптивних механічних систем, які знаходяться в умовах інтенсивного навантаження, що взаємодіють з різними полями та середовищами з урахуванням термо-, магніто-, електро-пружності деформованих тіл”(№ Д.Р.0197U001903) та 2000-2002 рр. “Розробка теоретичних та експериментальних методів дослідження коливань та надійності складних роторних систем з метою збільшення їх ресурсу та зниження енергетичних витрат на виготовлення та експлуатацію” (№ Д.Р. 0100U001651).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методичного і програмного забезпечення для аналізу впливу випадкових просідань колон фундаменту та випадкової зміни модулю пружності його матеріалу під час експлуатації на вібраційні характеристики і показники надійності системи ТФО при вібраційних відмовах.

Для вирішення зазначеної проблеми необхідно:

- провести збір і аналіз даних по просіданням і пружним властивостям фундаментів у процесі тривалої експлуатації;
- розробити адекватні математичні моделі системи ТФО, що дозволяють враховувати динамічний взаємозв'язок окремих конструктивних елементів цієї системи, а також вплив на динамічне поведіння конструкції просідань і модулю пружності матеріалу фундаменту, які ураховуються як квазістатичні нестационарні випадкові функції часу;
- розробити на базі методу кінцевих елементів (МКЕ) підходи, що дозволяють розв'язувати задачі: власних, стаціонарних вимушених коливань і надійності системи ТФО при випадкових змінах геометрії і жорсткостних властивостей фундаменту, а також з урахуванням контактної взаємодії турбоагрегату і фундаменту;
- провести чисельні дослідження на основі розроблених підходів, програмного забезпечення і сучасних програмних комплексів вібраційних характеристик і показників надійності системи ТФО, а також аналіз чутливості цих характеристик до випадкових факторів, що досліджувалися;
- провести чисельні експерименти з раціонального введення різних конструктивних елементів у корпус турбіни з метою вібраційної відстройки системи ТФО.

*Об'єкт дослідження* – коливання і відмови системи ТФО з урахуванням тривалої експлуатації.

*Предмет дослідження* – вібраційні характеристики і показники надійності систем ТФО при заданих імовірнісних характеристиках просідань фундаменту і його пружних характеристик.

*Методи дослідження*, прийняті в роботі, складають комплекс чисельних методів пружньодеформованих тіл з використанням МКЕ, методи теорії імовірностей, теорії випадкових функцій, теорії коливань, теорії чутливості і теорії надійності.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- дістали подальший розвиток підходи вирішення задач коливань і надійності для систем ТФО внаслідок урахування випадкових факторів, обумовлених просіданнями фундаменту і зміною його пружних властивостей у процесі тривалої експлуатації;
- удосконалені математичні моделі і дістали подальший розвиток розрахункові схеми, що адекватно описують конструктивні, технічні, експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи ТФО;
- дістало подальший розвиток прогнозування статичного і динамічного поведіння системи ТФО з урахуванням випадкової зміни параметрів фундаменту і контактної взаємодії між турбоагрегатом і фундаментом;

- вперше виконані чисельні дослідження вільних, вимушених коливань та вібраційної надійності системи ТФО з урахуванням впливу випадкових просідань фундаменту.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створені в роботі підходи, алгоритми і програмне забезпечення дозволили виконати ряд розрахунків з метою визначення вібраційних характеристик і показників надійності турбоустановок Зміївської і Придніпровської ТЕС. Проведено ряд чисельних експериментів з метою внесення найбільш ефективних конструктивних рішень для резонансної відстройки системи ТФО, які впроваджені в практику проектування ВАТ “Турбоатом”. Це підтверджено актом про впровадження науково-дослідної роботи.

Результати роботи використовуються в НТУ“ХП” у навчальному процесі для студентів, при виконанні курсових, дипломних і науково-дослідних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Автором дисертаційної роботи особисто зроблено: аналіз даних з просідань і коефіцієнту пружності матеріалу фундаментів; розробка засобів розв’язання задач детермінованих та випадкових коливань, надійності системи ТФО з урахуванням випадкових факторів; створення математичних моделей; чисельні дослідження та їх аналіз.

**Апробація результатів роботи.** За матеріалами дисертаційної роботи були зроблені доповіді і публікації на міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука,техніка,технологія, освіта, здоров'я”(Харків,2000р.),“Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання” (Харків, 2000 р.), “Надійність машин та прогнозування їх ресурсу” (Івано-Франківськ, 2000 р.), “Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві” (Харків, 2000, 2001, 2002р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, серед них 6 статей в фахових виданнях ВАК України, 2 статті і 1 тези доповідей надруковано у трудах міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків та одного додатка. Повний обсяг дисертації складає 139 сторінок, 59 ілюстрацій по тексту, 2 ілюстрацій на 1 сторінці, 11 таблиць по тексту, 1 додаток на 1 сторінці, 117 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 124 сторінки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність та наукова новизна дисертаційної роботи, надана основна мета досліджень та загальна характеристика роботи.

**Перший розділ** містить опис систем ТФО, умови їхньої експлуатації, підходи до розв'язання задач вимушених та вільних коливань цих систем, сформульовані основні задачі дослідження. У **підрозділі 1.1** зроблено опис системи ТФО (рис. 1) та її складових елементів. Більшість уваги звернено до конструкцій турбоагрегатів та фундаментів.

Рис.1. Система ТФО з турбіною потужністю 300 МВт: I–фундамент, II–турбіна, III–конденсатор, IV–генератор, V–збудник генератора; 1-8 – колони фундаменту.

**Підрозділ 1.2** містить опис експериментальних даних з просідань залізобетонних фундаментів та модулю пружності залізобетону. Наголошено, що ці параметри системи ТФО залежать від багатьох факторів, мають випадковий характер, значний розбіг характеристик і суттєво впливають на динаміку та надійність системи. В окремих випадках просідання фундаментів приводили до аварійного останову турбоагрегату. Відзначено спільний характер змін просідань фундаментів та модулю пружності залізобетону: найбільші зміни здійснюються у перший рік експлуатації. Таким чином, для аналізу коливань та вібраційної надійності систем ТФО, які знаходяться в експлуатації більш ніж один рік, просідання фундаментів та модулі пружності залізобетону можна розглядати як квазістатичні випадкові функції.

**Підрозділ 1.3** присвячено огляду підходів до розв'язання задач вільних і вимушених коливань системи ТФО, який структуровано за типами моделей, які використовувалися при дослідженнях. Відзначено, що значний вплив на вільні та вимушені коливання валопроводів та фундаментів здійснюють характеристики ґрунту основи, просідання фундаменту та його жорсткісні характеристики. Зроблено висновок, що математичне дослідження коливань та надійності системи ТФО з урахуванням випадковості просідань фундаменту та інших параметрів на базі просторових моделей корпусних конструкцій і фундаменту ще не здійснювалося, має практичне значення, є актуальною задачею і потребує розвитку як у напрямку урахування випадковості параметрів системи, так і у напрямку просторового моделювання усієї системи.

**Другий розділ** містить математичну постанову основної задачі дослідження. На основі літературного огляду виділено дві основні групи випадкових факторів: випадкові просідання (вектор  $\{S(t)\}$ ) і випадкові жорсткості (вектор  $\{X(t)\}$ ) колон фундаменту. Закономірності їхньої часової зміни при тривалій експлуатації дозволяють для опису векторних процесів  $\{S(t)\}$  і  $\{X(t)\}$  використовувати моделі нестационарних квазістатичних випадкових процесів, які повністю описуються одномірними щільностями ймовірності  $f(\{S\},t)$ ,  $f(\{X\},t)$  чи математичними сподіваннями та дисперсіями  $\{\sigma_x^2\}$ ,  $\{\bar{X}\}$ ,  $\{\sigma_S^2\}$ ,  $\{\sigma_X^2\}$ . Таким чином, векторні

випадкові процеси  $\{S(t)\}$  і  $\{X(t)\}$  у фіксований момент часу можна розглядати як випадкові величини з відомими ймовірнісними характеристиками. Використовуючи метод кінцевих елементів (МКЕ), основне рівняння вимушених коливань системи ТФО з випадковою структурою та параметрами можна записати у вигляді:

$$[M_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + M_r^{S_0}(\{X_0\})]\{\ddot{q}\} + [C_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + C_r^{S_0}(\{X_0\})]\{\dot{q}\} + [K_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + K_r^{S_0}(\{X_0\})]\{q\} = \{R(t)\}, (1)$$

де  $M_d^{\bar{S}}, C_d^{\bar{S}}, K_d^{\bar{S}}$  - матриці мас, демпфірування, жорсткості, коефіцієнти яких є квазістаціонарні детерміновані функції часу;  $M_r^{S_0}, C_r^{S_0}, K_r^{S_0}$  - матриці мас, демпфірування, жорсткості, коефіцієнти яких є квазістаціонарні випадкові функції часу;  $\{q(t)\}$  – вектор випадкових узагальнених переміщень системи;  $\{R(t)\}$  - вектор випадкових зовнішніх навантажень.

Для досягнення основної мети дослідження необхідно розв'язати задачі статистичної динаміки і вібраційної надійності системи ТФО, яка описується матричним диференціальним рівнянням (1), у якому випадкові вектори  $\{S(t)\}$  і  $\{X(t)\}$  задають відповідно структуру та зміну коефіцієнтів матриць. Для цього спочатку необхідно розв'язати задачі власних та вимушених детермінованих коливань системи ТФО при заданих реалізаціях векторів  $\{S(t)\}$ ,  $\{X(t)\}$  і  $\{R(t)\}$ .

**Третій розділ** містить вирішення задач власних та вимушених детермінованих коливань, опис КЕ та моделювання системи ТФО. Основні рівняння наведені у **підрозділі 3.1**, відповідно до (1) вони мають наступний вигляд:

$$\det[K_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + K_r^{S_0}(\{X_0\}) - p_j^2(M_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + M_r^{S_0}(\{X_0\}))] = 0 \quad (2)$$

$$[K_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + K_r^{S_0}(\{X_0\}) - p_j^2(M_d^{\bar{S}}(\{\bar{X}\}) + M_r^{S_0}(\{X_0\}))]\{V_j\} = 0 \quad (3)$$

$$\{A(\{S\}, \{X\}, \omega)\} = V [\mathbf{diag} \frac{e^{i\varphi_j}}{\sqrt{(p_j^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 p_j^2 n_j^2}}] V^T \{R_0\}, \quad \text{tg} \varphi_j = \frac{2\omega p_j n_j}{p_j^2 - \omega^2}, \quad (4)$$

де  $p_j$  -  $j$ -а власна частота системи;  $\{V_j\}$  – вектор  $j$ -ї власної форми системи;  $\{A\}$  – вектор амплітуд вимушених коливань;  $V$  – матриця власних форм системи;  $\{R_0\}$  - вектор амплітуд зовнішніх навантажень;  $\omega$  - частота навантаження.

Для визначення власних форм та частот використовувався метод ітерацій в підпросторі. Для розв'язання задачі вимушених коливань використовувався метод розкладу по власним формам коливань. Розробка моделей проводилась на базі МКЕ з використанням стрижневих, оболонкових КЕ з 6 ступінями волі в вузлі та КЕ жорсткість і маса.

У **підрозділі 3.2** наведені результати розроблення моделей фундаментів рамного та рамно-стінового типу. Особлива увага була звернена на вибір моделювання окремих елементів фундаменту стрижнем або пластиною, та моделювання стиків елементів фундаменту. На базі чисельних досліджень підібран необхідний ступінь дискретизації моделей, що розглядаються. **Підрозділ 3.3** присвячено розгляду моделювання корпусів різних турбін. Чисельні дослідження показали необхідність урахування не тільки інерційних, але і пружних характеристик верхньої частини корпусів “сотової” конструкції.

У **підрозділі 3.4** розглянуто моделювання системи ТФО. Були створені симетрична (45247 ступенів волі, 8996 КЕ, 7887 вузлів) і повна (90422 ступенів волі, 17694 КЕ, 15150 вузлів) моделі системи (рис.2). Для моделювання системи ТФО використовувалися просторові моделі фундаменту і турбіни. Циліндр високого тиску турбіни, генератор, збудник генератора та інші елементи системи враховані системою зосереджених мас. Найбільш важливою особливістю моделей є поєднання турбіни і фундаменту системою стрижнів, що моделюють настановні клини та умови з'єднання корпусу турбіни з фундаментом.

На базі чисельних досліджень показано, що ґрунт основи в моделях системи ТФО можна враховувати як абсолютно жорсткий. Приведено порівняння симетричної і повної

Рис. 2. Симетрична модель системи ТФО, 2-5 опори валопроводу № 2-5.

моделі системи ТФО на базі характеристик вільних та вимушених коливань. Показано, що власні частоти симетричної моделі збігаються з власними частотами повної моделі, а амплітуди вимушених коливань симетричної моделі більші, чим у повної. Це зумовлено трансформацією несиметричних форм власних коливань (рис.3) у симетричній моделі системи. Приведено порівняння з експериментом, яке показало якісний збіг експериментальних даних з даними чисельних досліджень. Наголошено, що наявна чисельна різниця результатів зумовлена впливом випадковості коефіцієнту пружності елементів фундаменту та інших параметрів системи.

**Четвертий розділ** містить опис чисельних досліджень детермінованих власних і вимушених коливань системи ТФО та її складових елементів.

Рис. 3. Несиметрична власна форма повної моделі.

У **підрозділі 4.1** наведені результати дослідження впливу жорсткості фундаменту в опорних площинах на власні частоти і форми статору турбіни. Наголошено, що власні форми статору турбіни від жорсткості фундаменту не залежать, серед власних частот залежність від



жорсткості фундаменту мають лише ті, відповідні власні форми яких зумовлені коливаннями згину усього корпусу. Наведена діаграма залежності власних частот корпусу турбіни від жорсткості фундаменту в опорних площинах.

**Підрозділ 4.2** містить результати дослідження вібраційних характеристик корпусів турбін К-300-240 і К-325-23,5 при рівномірній пружності фундаменту в опорних площинах. Зроблено порівняння з експериментальними даними, яке показало якісний збіг амплітуд вимушених коливань для четвертої опори валопроводу та чисельний збіг для п'ятої. Після порівняння власних частот, форм та амплітуд вимушених коливань опор валопроводу та опор внутрішнього устаткування (обойм) турбін К-300-240 та К-325-23,5 зроблено висновок про їх незначну різницю і можливість використання відомих вібраційних характеристик однієї турбіни для прогнозування вібраційної поведінки іншої.

У **підрозділі 4.3** приведені результати дослідження власних та вимушених коливань статора турбіни К-310-23,5 на двох типах моделей: з урахуванням фундаменту через систему жорсткостей та використанням його просторової моделі. Показано, що для аналізу коливань статора турбіни необхідно враховувати його динамічну взаємодію з фундаментом. Дослідження вібраційних характеристик статора турбіни дозволило підібрати для зменшення амплітуд вимушених коливань у робочому діапазоні 2 варіанта схем жорсткості. За допомогою порівняння з експериментальними даними був визначений коефіцієнт поглинання енергії.

**П'ятий розділ** містить теоретичне розв'язання задач статистичної динаміки і вібраційної надійності. Для цього у **підрозділі 5.1** розглянуто розв'язання задачі вимушених коливань системи ТФО при заданих реалізаціях векторів  $\{S(t)\}$ ,  $\{X(t)\}$  на основі запропонованого алгоритму:

1. побудова КЕ моделі системи ТФО при заданій реалізації вектора  $\{S(t)\}$ ;
2. розрахунок параметрів контактної взаємодії турбіни з фундаментом;
3. модифікація КЕ моделі системи ТФО за результатами етапу 2;
4. розрахунок власних частот і форм при заданій реалізації вектора  $X(t)$ ;
5. розрахунок амплітуд вимушених стаціонарних коливань при заданій реалізації вектора  $\{R(t)\}$ .

У **підрозділі 5.1.1** наведено результати обробки експериментальних даних з просідань залізобетонних фундаментів та модулю пружності залізобетону.

У **підрозділі 5.1.2** розглядається розв'язання задачі контактної взаємодії турбіни з фундаментом (етап 2). Її результатом є визначення статичного положення турбіни і коефіцієнтів вектору жорсткостей контактної взаємодії  $\{C\}$  при заданій реалізації вектора просідань колон фундаменту  $\{S(t)\}$ .

Статичне положення турбіни визначається за аналізом деформованого стану системи ТФО, знайденого при розв'язанні статичної контактної задачі методом Ньютона-Рафсона, основне рівняння якої має вигляд:

$$[K_d^S + K_r^S(\{X\})]\{q\} = \{R\}, \quad (5)$$

де  $\{R\}$  - вектор навантажень від ваги конструкції.

Для визначення коефіцієнтів вектору жорсткостей контактної взаємодії запропоновано алгоритм, основна ідея якого полягає у наступному:

На першому етапі за допомогою розрахунку статичної контактної задачі визначаються місця контакту, в яких задаються жорсткі з'єднання по вертикальним переміщенням між турбіною та фундаментом (вектор фіктивних контактних жорсткостей  $\{C\}^1$ ). При коливаннях турбіни її контакт із фундаментом може змінюватися. Для урахування цього проводиться порівняння амплітуд вимушених коливань кожної контактної площини турбіни з відповідними зазорами між турбіною та фундаментом, на основі якого формуються вектори для задання жорсткостей в місцях вибору зазору:  $\{C\}^L$  - лінеаризовані жорсткості, пропорційні величині вибору зазору, та  $\{C\}^M$  - однакові жорсткості, які мають такі ж значення як і коефіцієнти вектору  $\{C\}^1$ . Вводяться вектори  $\{C\}^E = \{C\}^1 + \{C\}^L$  та  $\{C\}^2 = \{C\}^1 + \{C\}^M$ . Таким чином, вектори  $\{C\}^1$  та  $\{C\}^2$  відповідають двум граничним положенням турбіни на фундаменті, а вектор  $\{C\}^E$  є лінійною апроксимацією дійсного стану.

У підрозділі 5.1.3 розглядається розв'язання задачі власних та вимушених випадкових коливань на основі методу чутливості, що базується на розкладі власних частот і амплітуд вимушених коливань у ряд Тейлора. Наведені рівняння для математичних сподівань та дисперсій амплітуд вимушених коливань, які повністю задають одномірні щільності ймовірностей при умові їх нормальності. В окремому випадку некоррельованості компонент векторів  $\{S(t)\}$  і  $\{X(t)\}$  математичні сподівання та дисперсії амплітуд вимушених коливань мають наступний вигляд:

$$M[A_K] = A_K(\{\bar{S}\}, \{\bar{X}\}, \omega) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 A_K}{\partial S_j^2} \bigg|_{\substack{\{S\}=\{\bar{S}\}, \\ \{X\}=\{\bar{X}\}}} \sigma_{S_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^m \frac{\partial^2 A_K}{\partial X_l^2} \bigg|_{\substack{\{S\}=\{\bar{S}\}, \\ \{X\}=\{\bar{X}\}}} \sigma_{X_l}^2, (K=1..N) \quad (6)$$

$$\sigma_{A_k}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 A_k}{\partial S_i^2} \left| \begin{array}{c} \sigma_{S_i}^2 \\ \{S\}=\{S\}, \\ \{X\}=\{X\} \end{array} \right| + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^m \frac{\partial^2 A_k}{\partial X_l^2} \left| \begin{array}{c} \sigma_{X_l}^2 \\ \{S\}=\{S\}, \\ \{X\}=\{X\} \end{array} \right| + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^m \frac{\partial^2 A_k}{\partial S_i^2} \frac{\partial^2 A_k}{\partial X_l^2} \left| \begin{array}{c} \sigma_{S_i}^2 \sigma_{X_l}^2 \\ \{S\}=\{S\}, \\ \{X\}=\{X\} \end{array} \right|, \quad (7)$$

де  $A_k$  – амплітуди вимушених коливань  $k$ -ї опори ротору;  $N$  – кількість опор ротору;  $\sigma_{S_i}^2$ ,  $\sigma_{X_l}^2$  – дисперсії компонент векторів  $\{S(t)\}$  и  $\{X(t)\}$  відповідно.

**Підрозділ 5.2** містить вирішення задачі вібраційної надійності. Для цього вводиться область працездатних станів, що задається діапазонами частот ( $\omega_{Hj} \leq \omega \leq \omega_{Bj}$ ,  $j=1..T$ ) і припустимими значеннями амплітуд вимушених коливань опор ротора  $A_k$  у цих діапазонах. Відмовою системи ТФО вважається перевищення гранично-припустимих значень амплітудами вимушених коливань хоча б однієї опори ротора в контрольних частотних діапазонах. Таке визначення відмови відповідає міжнародному (ISO 3945) і вітчизняному (ГОСТ 25364-97) стандартам за нормами вібрації стаціонарних парових турбоагрегатів. Імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  при квазістатичній кумулятивній зміні векторів  $\{S(t)\}$  і  $\{X(t)\}$ , виходячи з умови працездатності системи ТФО, буде представляти ймовірність випадкової події:

$$P(t) = P[A_k(\{S(t)\}, \{X(t)\}, \omega) < G_j, \quad (k=1..N), \quad \omega_{Hj} \leq \omega \leq \omega_{Bj}, \quad (j=1..T)], \quad (8)$$

де  $G_j$  – гранично-припустиме значення амплітуд  $A_k$  для  $j$ -го частотного діапазону;  $T$  – число частотних діапазонів, на яких задаються обмеження  $G_j$ .

Формули для обчислювання цієї ймовірності наводяться у підрозділі.

**Шостий розділ** містить опис чисельних досліджень впливу випадкових параметрів системи ТФО на характеристики вібрації та надійності. У **підрозділі 6.1** наводяться результати дослідження впливу просідань фундаменту на характеристики вільних та вимушених коливань системи ТФО. Зроблено аналіз впливу зміну положення рівноваги та контактної взаємодії турбоагрегату з фундаментом, який показав необхідність урахування при чисельних дослідженнях обох факторів.

Проаналізован вплив векторів контактної взаємодії  $\{C\}^1$ ,  $\{C\}^2$ ,  $\{C\}^E$  на характеристики коливань системи ТФО. Показана наявна різниця, яка найбільша при просіданнях колон п'ятої пари (рис. 4).

Аналіз експериментальних даних показав, що найбільші просідання мають колони пар фундаменту № 3, 4, 5. Тому детальне дослідження впливу просідань фундаменту на характеристики вільних та вимушених коливань проведене при наступних комбінаціях:

1. просідання пар колон № 3, 4, 5 по окремої;
2. просідання двох із трьох пар колон № 3, 4, 5 на однакову величину;
3. просідання трьох пар колон № 3, 4, 5 на різну величину;
4. просідання окремих колон з пар № 3, 4, 5.

Найбільший вплив на характеристики власних та вимушених коливань надають просідання колон фундаменту за першим та останнім варіантами. На рис.5 показано вплив просідань колон фундаменту за першим варіантом на амплітуди вимушених коливань опор ротору .

У **підрозділі 6.2** описані результати дослідження вібраційної надійності системи ТФО з урахуванням випадковості просідань колон фундаменту та модулю пружності його матеріалу.

Проаналізована точність знаходження коефіцієнтів впливу просідань колон фундаменту на амплітуди вимушених коливань. За допомогою знайдених коефіцієнтів (таблиця) стає можливим швидкий аналіз амплітуд вимушених коливань при наявних просіданнях колон фундаменту. Показана залежність амплітуд вимушених коливань від абсолютних величин просідань колон фундаменту (рис. 6). Наведені результати обчислень імовірності безвідмовної роботи системи ТФО (рис. 7) за критеріями відмов, що розглядаються.

Рис. 4. Амплітуди вертикальних коливань опори валопроводу №4.

Рис. 5. Амплітуди вертикальних коливань опори валопроводу №4 .

Таблиця.

Чутливість амплітуд вимушених коливань до просідань колон фундаменту.

№ опор ротору	$\frac{\partial A}{\partial S_3}$	$\frac{\partial A}{\partial S_4}$	$\frac{\partial A}{\partial S_5}$	M[Ак], м'	$\sigma_{Ак}^2$
3	7,906e-5	2,665e-4	6,909e-5	7,353e-6	2,278e-11
4	7,402e-5	4,392e-4	2,961e-5	7,767e-6	5,535e-11
5	1,48e-5	6,415e-5	9,870e-6	5,078e-6	1,231e-12

Рис. 6. Залежності амплітуд вимушених коливань опор ротора від просідань колон фундаменту пари № 4.

Рис. 7. Імовірності безвідмовної роботи системи ТФО.

Проведено дослідження впливу розміру контрольного діапазону на ймовірність безвідмовної роботи системи ТФО.

## ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання дисертаційної роботи розроблено методичне і програмне забезпечення для аналізу впливу випадкових просідань колон фундаменту та випадкової зміни модулю пружності його матеріалу під час експлуатації на вібраційні характеристики і показники надійності системи ТФО при вібраційних відмовах.

2. Проведено огляд експериментальних даних по просіданням фундаментів та модулю пружності залізобетону фундаменту. Цей огляд показав наявність різних випадкових нерівномірних просідань, які в окремих випадках приводили до аварійного останову турбоагрегату. Стосовно модулю пружності залізобетону було з'ясовано, що для ненавантаженого залізобетону він з часом зростає, а вплив вібраційного навантаження призводить до його розбіжності на 30-40%. Одночасний вплив просідань фундаментів та модулю пружності його матеріалу на вібраційні характеристики і надійність систем ТФО теоретично не було вивчено, однак є актуальною і важливою задачею.

3. Дістали подальший розвиток підходи вирішення задач коливань і надійності для систем ТФО внаслідок урахування випадкових факторів, обумовлених просіданнями фундаменту і зміною його пружних властивостей у процесі тривалої експлуатації.

4. Удосконалено математичні моделі та дістали подальший розвиток розрахункові схеми, що адекватно описують конструктивні, технічні, експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи ТФО.

5. Дістало подальший розвиток прогнозування статичного і динамічного поведіння системи ТФО з урахуванням випадкової зміни параметрів фундаменту і контактної взаємодії між турбоагрегатом і фундаментом.

6. Вперше виконано чисельні дослідження вільних, вимушених коливань та вібраційної надійності системи ТФО з урахуванням впливу випадкових просідань фундаменту за допомогою розробленого методичного, програмного забезпечення та широко відомих програмних пакетів.

7. Створені в роботі підходи, алгоритми і програмне забезпечення дозволили виконати ряд розрахунків з метою визначення вібраційних характеристик і показників надійності турбоустановок Зміївської і Придніпровської ТЕС. Проведено ряд чисельних експериментів з

внесення найбільш ефективних конструктивних рішень з резонансної відбудови системи ТФО, які впроваджено в практику проектування ВАТ “Турбоатом”. Це підтверджено актом про впровадження науково-дослідної роботи. Результати роботи використовуються в НТУ“ХПІ” у навчальному процесі для студентів, при виконанні курсових, дипломних і науково-дослідних робіт.

8. Результати роботи можуть використовуватися в проектних організаціях, на заводах і електростанціях для прогнозування вібраційного стану і надійності енергоблоків за результатами моніторингу розглянутих випадкових параметрів.

### СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование динамического взаимодействия турбоагрегата К-325-23.5 с фундаментом // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.-Харьков:ХГПУ.- 1999.-№53.-С.64-69.

*Здобувачу належить розробка математичних моделей, проведення чисельних досліджень, аналіз характеристик коливань корпусу турбіни з урахуванням пружності фундаменту, визначення необхідного рівню дискретизації моделей та мінімального значення коефіцієнту загасання.*

2. Красников С. В. Исследование влияния опирания на динамические характеристики системы турбоагрегат-фундамент // Динамика и прочность машин.- Харьков:ХГПУ.- 1999.- №57.- С.102-106.

3. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование влияния кон-структивных параметров на динамические характеристики системы турбоагрегат-фундамент // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.-Харьков:ХГПУ.- 2000.-№ 100.-С.66-69.

*Здобувачем розроблені математичні моделі, проведенні чисельні дослідження, аналіз їх результатів, визначення величин, на які можливо зменшити товщини різних стінок корпусу турбіни без істотної зміни спектру власних частот.*

4. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Использование САД-систем для моделирования динамики турбоагрегатов//Вестник Харьковского государственного политехнического университета. -Харьков:ХГПУ.- 2000. – №116.- С. 57-60.

*Внесок здобувача полягає в розробці математичних моделей, проведенні чисельних досліджень, аналізі форм власних коливань моделей корпусів турбін.*

5. Жовдак В.А., Кабанов А.Ф., Красников С. В., Степченко А.С. Исследование динамики

статорных частей турбин К-300-240 и К-325-23,5 ХГТЗ // Проблемы машиностроения.- Харків:“Контраст“.- 2001.- Т.4,№3-4.-С.4-12.

*Здобувачем розроблено математичні моделі, проведено чисельні дослідження, оброблено результати експериментальних та чисельних досліджень, зроблено пояснення збігу та різниці цих результатів.*

6. Жовдак В.А., Кранцфельд Я.Л., Красников С. В., Степченко А.С. Влияние просідань колонн фундамента на его вибрационные характеристики // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків:НТУ “ХПІ“.- 2002.- Т.8, №9. -С.69-74.

*Здобувачем розроблено математичні моделі та проведено: обробка експериментальних даних з просідань фундаментів, розробка засобу урахування просідань фундаментів, проведення і аналіз чисельних досліджень впливу просідань фундаментів на їх характеристики власних та вимушених коливань.*

7. Жовдак В.А., Кабанов А.Ф., Красников С.В., Степченко А.С. Построение эффективных моделей турбоагрегатов для анализа динамических характеристик и надежности конструкции // Вісник інженерної академії України. Спеціальний випуск.– Київ: Інженерна академія України.- 2000. – С. 419-422.

*Здобувачем проведені розробка математичних моделей, чисельні дослідження та обробка результатів.*

8. Жовдак В.А., Красников С. В., Степченко А.С. Анализ динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент на основе 3-х мерных математических моделей // Вісник інженерної академії України.– Київ: Інженерна академія України.-2001.-№3.-С. 75-78.

*Здобувачу належить розробка математичних моделей, проведення досліджень з визначення необхідної моделі корпусу турбіни “сотового” типу.*

9. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Прогнозирование надежности энергетических турбоагрегатов с учетом случайных технологических несовершенств // Доповіді МНТК “Надійність машин та прогнозування їх ресурсу”. - Том 1.- Івано-Франківськ:ІФДТУНГ.- 2000. -С.277-283.

*Здобувачу належить розробка математичних моделей, проведення чисельних досліджень впливу пружності фундаменту на спектр власних частот корпусу турбоагрегату та його вібраційну надійність.*

10. Жовдак В.А., Красников С. В., Степченко А.С. Исследование динамических характеристик турбоагрегата К-235-23.5 ХГТЗ при варьировании конструкционных

параметров // Материалы международной научно-технической конференции “Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования”. – Харьков: Институт проблем машиностроения НАН Украины.- 2000.- С.183

*Здобувачем проведени розробка математичних моделей, чисельні дослідження, обробка результатів експериментальних та чисельних досліджень.*

11.Красников С. В. Статический анализ перемещений опор ротора паровой турбины. Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве // Труды 5-й международной научно-технической конференции “Фізичні та комп’ютерні технології у народному господарстві”.- Харьков:ХНПК “ФЭД”.- 2002.- С. 669-672.

## АНОТАЦІЇ

Красніков С.В.“Коливання та надійність систем турбоагрегат-фундамент-основа з урахуванням випадковості параметрів”.-*Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.- Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці методичного і програмного забезпечення аналізу впливу просідань колон фундаменту та модулю пружності залізобетону фундаменту на вібраційні характеристики і показники надійності системи турбоагрегат-фундамент-основа (ТФО) при вібраційних відмовах. Розроблені теоретичні підходи, математичні моделі і програмне забезпечення для розв’язання наступних задач: контактної взаємодії окремих підсистем – корпусу турбіни і фундаменту; власних і вимушених коливань, статистичної динаміки і вібраційної надійності системи ТФО з урахуванням випадковості параметрів системи і зовнішнього впливу. Виконаний широкий спектр чисельних досліджень характеристик власних, вимушених коливань і надійності з урахуванням впливу зазначених випадкових факторів, що обумовлені різними технологічними й експлуатаційними причинами. Виявлено фізичні закономірності формування вібраційних відмовлень, показана можливість виникнення небезпечних резонансів у контрольованих частотних діапазонах. Результати проведених досліджень упроваджені при модернізації турбоагрегатів Зміївської, Придніпровської ТЕС.

*Ключові слова:* коливання, методи дослідження та розрахунку динамічних процесів у машинах, надійність машин.



*Красников С. В. “Колебания и надежность систем турбоагрегат-фундамент-основание с учетом случайности параметров”. –Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09–динамика и прочность машин.-Национальный техни-ческий университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО) является системой взаимосвязанных элементов, способных возбуждать, усиливать и гасить колебания. Система ТФО состоит из лежащего на грунте фундамента и устанавливаемых на него турбины, конденсатора, генератора и возбудителя генератора. Ротора турбины и генератора с помощью муфт объединены в единый валопровод. Основным источником колебаний являются ротора, основными элементами, определяющими жесткость системы– фундамент, опоры подшипников роторов, корпусные конструкции турбины и генератора. Длительная эксплуатация систем ТФО привела к формированию целого комплекса факторов, непосредственно влияющих на надежность этих конструкций. К их числу можно отнести взаимодействие фундамента с основанием и внутренние физико-химические процессы, происходящие в материале фундамента. Несмотря на многолетнюю строительную практику, большой объем накопленного экспериментального материала и значительные теоретические разработки, вопросы, связанные с взаимодействием сооружений с основанием и деградацией свойств железобетонных фундаментов, остаются одними из наиболее сложных и недостаточно изученных.

Диссертация посвящена разработке методического и программного обеспечения анализа влияния просадок колон фундамента и его жесткости на вибрационные характеристики и показатели надежности системы турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО) при вибрационных отказах. Разработаны КЭ модели систем ТФО, которые позволяют учитывать динамическое взаимодействие отдельных элементов и случайное изменение параметров системы. На основе этих моделей разработаны подходы и программное обеспечение для решения следующих задач: контактного взаимодействия отдельных подсистем – корпуса и фундамента; собственных и вынужденных колебаний, статистической динамики и вибрационной надежности системы ТФО с учетом случайности параметров системы. При этом, учет случайности параметров системы приводит к необходимости решения задач статистической динамики и надежности с использованием математических моделей с переменной (случайной) структурой (вследствие учета случайности просадок фундамента) и с переменными (случайными) параметрами (вследствие случайности жесткости фундамента). Проведено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными, которое показало хорошее качественное совпадение.

Выполнен широкий спектр численных исследований характеристик собственных, вынужденных колебаний и надежности с учетом влияния указанных случайных факторов. Выявлены физические закономерности формирования вибрационных отказов, показана возможность возникновения опасных резонансов в контролируемых частотных диапазонах. Проведенные исследования внедрены на практике ОАО “Турбоатом” при модернизации систем ТФО Змиевской и Приднепровской ТЭС.

*Ключевые слова:* колебания, методы исследования и расчета динамических процессов в машинах, надежность машин.

Krasnikov S.V. “Vibration and reliability of systems turbine-foundation-base in view of parameters randomness”.-Manuscript.

Dissertation on competition scientific degree of candidate of technical science according to the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines.-National technical university “Kharkov polytechnical institute”, Kharkov, 2003.

Turbine- foundation-base (TFB) is system of the interconnected elements, capable to raise, strengthen and extinguish vibration. Long-lived maintenance has led to formation of the whole complex of the factors directly influencing reliability of turbine units. Theoretical approaches, mathematical models and the software for the decision of the following problems are developed: nonlinear static problems of contact interaction of separate subsystems – cases of the turbine and the base; own and forced vibration, statistical dynamics and vibrating reliability of system TFB in view of parameters randomness of system and external influence. The wide spectrum of the numerical researches connected to the decision of various problems of own, forced vibration and reliability prediction in view of influence of the specified random factors, which caused is executed by the different technological and operational reasons. Physical laws of formation of the vibrating refusals, the shown opportunity of occurrence of dangerous resonances in controllable frequency ranges are revealed.

*Key words:* vibration, methods of investigation and calculation dynamical processes in machines, machines reliability.

АВТОРЕФЕРАТ

**КОЛИВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ  
СИСТЕМ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВА  
З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОСТІ ПАРАМЕТРІВ**

КРАСНІКОВ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Трубаєв О.І.

Обсяг 0,9 авт. аркуша

Тираж 100 примірників.