

**С. В. КРАСНИКОВ**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., НТУ «ХПІ»

## **МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ФУНДАМЕНТІВ ПАРОВИХ ТУРБІН**

Розглядається працездатність фундаментів парових турбін, що мають значний час експлуатації. Запропоновані методики дослідження та прогнозування працездатності фундаментів при тривалому строку експлуатації. Вони базуються на нормативних, експериментальних та розрахункових даних з експлуатації фундаментів парових турбін електростанцій. В основі методик є оцінка поточного стану конструкції за параметрами вібрації. Розроблені методики пропонуються для використання на електростанціях для існуючих та нових фундаментів парових турбін.

**Ключові слова:** працездатність, вібрація, вимушені коливання, фундамент, парова турбіна.

**Вступ.** Фундаменти парових турбін для електростанцій у східній Європі традиційно виготовляються із залізобетону. Із середини ХХ століття застосовуються збірні залізобетонні конструкції замість монолітного виконання [1, 2], що дозволило скоротити строки будівництва й витрати залізобетону, але привело до зниження твердості нових фундаментів і збільшило ймовірність появи резонансу в робочому діапазоні. Наявні теоретичні методи на час проектування більшості енергоблоків не дозволяли обчислити необхідні вібраційні характеристики конструкцій. Було проведено значний обсяг експериментальних обстежень [3, 4]. Останні норми з вібраційної оцінки фундаментів турбоагрегатів базуються на проведенні експериментальних обстежень обмеженого ряду фундаментів. Їхнє застосування розраховано в першу чергу на нові фундаменти. Це є причиною наявності великого парку фундаментів, що не задовольняють прийнятим за останні 15 років стандартам. Такі фундаменти експлуатуються відповідно до індивідуальних норм. По суті кожний фундамент є унікальним у силу природи бетону та особливостей будівництва. Це пов'язано з тим, що при будівництві використовується, як правило, легкодоступний у місці будівництва наповнювач. Сезон, строки зведення, кліматичні умови й інші фактори завжди мають відмінності при зведенні кожного фундаменту. Оскільки кожний фундамент має свою унікальність, то їх можна віднести до дрібносерійного й індивідуального виробництва. Це приводить до необхідності створення специфічних і індивідуальних математичних моделей, методів для дослідження вібраційного стану й прогнозування надійності фундаментів зі значним строком експлуатації.

**Мета роботи.** Створення математичної моделі дослідження працездатності фундаменту, проведення досліджень на основі комбінованого розраху-

нково-експериментального підходу з метою визначення засобів по підвищенню надійності.

**Загальний опис методики.** Для розрахункової частини методики зручно використовувати скінчено-елементний підхід [5, 6]. Згідно цього методу система рівнянь для опису вимушених коливань фундаменту парової має вигляд:

$$M \{\ddot{q}(t)\} + K \{q(t)\} = r(t), \quad (1)$$

де  $M$  – матриця мас,  $K$  – матриця жорсткості,  $q(t)$  – вектор переміщень,  $r(t)$  – вектор навантажень.

Пропонується методика моніторингу й оцінки працездатності фундаментів парових турбін з генератором електричного струму при тривалому строку експлуатації. Вона полягає у визначенні декількох граничних областей працездатних станів, визначенні поточного стану конструкції, прогнозування стану із часом і способами зміни положення цього стану в область працездатних станів з більшим ступенем надійності.

Поточний стан конструкції визначається вектором переміщень  $q(t)$  у контрольних точках фундаменту. Це безумовно є спрощенням, для більше правильної оцінки працездатності варто оперувати величинами динамічних напруг.

Будемо розглядати наступні визначення області працездатних станів: загальна область працездатних станів, область стабільних працездатних станів, область індивідуальних стабільних працездатних станів, область проектного працездатного стану.

Загальна область працездатних станів – визначається величинами переміщень для вектора  $q(t)$ , при яких досягнення границі  $A_1$  гарантовано приводить до відмови системи й руйнуванню конструкції. Ця область відповідає низькому ступеню надійності конструкції й невеликому строку експлуатації.

Область стабільних працездатних станів – визначається граничними величинами переміщень для вектора  $q(t)$ , що відповідають державним і промисловим нормам експлуатації (Б) для великого класу фундаментів. Знаходження усередині цієї області гарантує працездатний стан конструкції.

Область індивідуальних стабільних працездатних станів – границя (В) визначається індивідуальними правилами технічної експлуатації. Знаходження усередині цієї області мають на увазі малу ймовірність відмови окремо взятої конструкції.

Область проектного працездатного стану – границя  $A_0$  визначається проектними нормами, індивідуальними правилами технічної експлуатації. Знаходження усередині цієї області гарантує працездатний стан конструкції.

Позначимо поточний стан конструкції через  $Z$ :

$$Z = Z(q(t)). \quad (2)$$

Для (2) завжди виконується наступна умова:

$$Z(q(t)) < A_1. \quad (3)$$

У загальному випадку, як правило, виконується умова

$$A_0 < Z(q(t)) < A_1. \quad (4)$$

Обозначимо ресурс роботи фундаменту через  $T$ . Тоді імовірність безвідомної роботи можна записати наступним чином:

$$P(t) = P(Z(q(t)) < A_1, 0 < t < T). \quad (5)$$

У спрощеному варіанті поточний стан конструкції  $Z$  визначається величинами вібраційних переміщень  $q(t)$  у контрольних точках. У загальному випадку  $Z$  визначається на основі комплексного аналізу вібраційних параметрів (переміщення, швидкості, прискорення, напруги, імовірність відмови окремих елементів та інше).

Пропонується наступна методика моніторингу й оцінки працездатності фундаментів під турбоагрегати при тривалому строку експлуатації:

- 1) визначення основних границь стану  $A_0, A_1$  і додаткових  $B, B$ ;
- 2) визначення поточного стану конструкції  $Z$ ;
- 3) визначення діапазону розташування поточного стану конструкції  $Z$ ;
- 4) визначення кривих стану конструкції  $Z$  за час експлуатації та проведення його аналіз;
- 5) оцінка працездатності конструкції у поточний та майбутній час;
- 6) визначення причин зниження працездатності фундаменту та комплексу заходів щодо її підвищення;
- 7) проведення уточнення границь  $B$  і  $B$  за результатами реконструкції.

Другий і наступний етапи методики проводяться на основі результатів попередніх етапів.

Для проведення моніторингу стану конструкції за четвертим етапом пропонується використовувати графіки кривих станів конструкції  $Z$ . Для їх побудови пропонується наступна методика:

- 1) проведення розрахункових досліджень вібраційного стану фундаменту на основі проектної документації, побудова вихідних точок для кривих стану;
- 2) одержання експериментальних даних вібраційного стану фундаменту при початку експлуатації (пуску енергоблоку) одним із двох способів: проведення вимірів на новій конструкції або використання даних вібраційних випробувань при прийомі фундаменту до експлуатації;
- 3) додавання нових крапок до кривих стану конструкції на основі розрахункових та експериментальних даних у плинні часу експлуатації;
- 4) апроксимація кривих стану на основі отриманих даних;
- 5) побудова графіків кривих стану в одному із двох діапазонів ( $A_0, A_1$ ) або ( $0, A_1$ ).

Для моніторингу стану конструкції можливі дві ситуації:

- 1) є достатня кількість розрахунково-експериментальних досліджень для одержання двох кривих стану (за розрахунковими та експериментальними даними);

2) обмежена кількість даних розрахунково-експериментальних досліджень, що дозволяють побудувати тільки один спільний графік кривої стану.

Для проведення експериментальних досліджень вібраційного стану фундаменту парової турбіни пропонується використовувати стаціонарний комплекс вібродіагностики, а за його відсутності – переносну низькочастотну багатоканальну апаратуру. Апаратура бажано має бути вимірювально-обчислювальним комплексом для виміру й реєстрації величин віброприскорень у часі з функціями запису, відтворення та експрес-аналізу швидкозмінних аналогових сигналів одночасно по кільком незалежним вимірювальним каналам.

При достатній кількості каналів за допомогою комплексу вібродіагностики можливо одразу за один вимір одержати всю необхідну інформацію. При недостатній кількості каналів пропонується наступна методика проведення виміру вібрації в одному з місць, що контролюються:

- 1) оцінка рівня шуму;
- 2) установка датчика;
- 3) підготовка обчислювального комплексу;
- 4) проведення виміру відповідно до обраної орієнтації;
- 5) завершення виміру, збереження даних і зняття датчика;
- 6) перехід до кроку 2 для зміни орієнтації датчика;
- 7) запуск спеціалізованого програмного забезпечення з алгоритмами обробки діаграм;
- 8) оцінка погрішності виміру параметрів вібрації в обраному напрямку;
- 9) повернення до кроку 1 або перехід до наступного місця виміру.

**Висновки.** Для дослідження та прогнозування працездатності фундаментів парових турбін електростанцій при тривалому строку експлуатації запропоновано загальна та дві допоміжні методики. Визначено декілька областей працездатності фундаменту. Дослідження поточного стану конструкції базується на експериментальних та розрахункових даних. В якості характеристик поточного стану пропонуються параметри вібрації в контрольованих місцях. Запропонована методика пов'язує існуючі нормативні документи, щодо оцінки працездатності, та наявні умови експлуатації фундаментів парових турбін на електростанціях.

**Список літератури:** 1. Рунов Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с. 2. Абашидзе А.И., Сапожников Ф.В., Казанджян А.Т. Фундаменты машин тепловых электростанций. – М.: Энергия, 1975. – 256 с. 3. Шейнин И.С., Цейтлин Б.В. Теоретическое исследование динамических характеристик ряда фундаментов под мощные турбоагрегаты // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. – 1981. – № 151. – С. 81-87. 4. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний систем турбоагрегат-фундамент. – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с. 5. Красніков С.В. Моделювання та аналіз вібраційних характеристик фундаменту енергоблоку потужністю 300 МВт // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2011. – № 52. – С. 107-111. 6. Красніков С.В. Моделювання власних коливань фундаменту турбогенератору потужністю 200 МВт // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 58 (1031). – С. 88-92.

**Bibliography (transliterated):** 1. Runov B.T. Issledovanie i ustranenie vibracii parovyh turboagregatov. Moscow: Energoizdat, 1982. 352 Print. 2. Abashidze A.I., Sapozhnikov F.V., Kazandzhyan A.T. Fundamenty mashin teplovyh elektrostancij. Moscow: Energiya, 1975. 256 Print. 3. Shejnin I.S., Cejlin B.V. Teoreticheskoe issledovanie dinamicheskikh harakteristik ryada fundamentov pod moschnye turboagregaty. Izv. VNIIG im. Vedeneeva. 1981. № 151. 81-87 Print. 4. Shul'zhenko N.G., Vorob'ev Yu.S. Chislennyj analiz kolebanij sistem turboagregat-fundament. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 232 Print. 5. Krasnikov S.V. Modelyuvannya ta analiz vibracijnykh kharakterystyk fundamentu enerhobloku potuzhnisty 300 MvT. Visnyk NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI», 2011. № 52. 107-111 Print. 6. Krasnikov S.V. Modelyuvannya vlasnykh kolyvan' fundamentu turbogeneratoru potuzhnisty 200 MvT. Visnyk NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. № 58 (1031). 88-92 Print.

*Поступила (received) 29.10.2014*

УДК 519 : 539 : 534

**Методика дослідження та прогнозування працездатності фундаментів парових турбін / С.В. Красніков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57 (1099). – С. 133-137. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.**

Розглядається працездатність фундаментів парових турбін, що мають значний час експлуатації. Запропоновані методики дослідження та прогнозування працездатності фундаментів при тривалому строку експлуатації. Вони базуються на нормативних, експериментальних та розрахункових даних з експлуатації фундаментів парових турбін електростанцій. В основі методик є оцінка поточного стану конструкції за параметрами вібрації. Розроблені методики пропонуються для використання на електростанціях для існуючих та нових фундаментів парових турбін.

**Ключові слова:** працездатність, вібрація, вимушені коливання, фундамент, парова турбіна.

УДК 519 : 539 : 534

**Методика исследования и прогнозирования работоспособности фундаментов паровых турбин / С.В. Красников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57 (1099). – С. 133-137. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.**

Предложены методики исследования и прогнозирования работоспособности фундаментов при продолжительном сроке эксплуатации. Предложены методики исследования и прогнозирования работоспособности фундаментов при продолжительном сроке эксплуатации. Они базируются на нормативных, экспериментальных и расчетных данных из эксплуатации фундаментов паровых турбин электростанций. В основе методик лежит оценка текущего состояния конструкции по параметрам вибрации. Разработанные методики предлагаются для использования на электростанциях для существующих и новых фундаментов паровых турбин.

**Ключевые слова:** работоспособность, вибрация, вынужденные колебания, фундамент, паровая турбина.

**Method for research and forecasting of working capacity for steam turbine foundations / S.V. Krasnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 57 (1099). – P. 133-137. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9130.**

Considered working capacity steam turbine foundations with significant time of operation using. Particular attention is paid to the foundation with vibration levels higher than current standard rates. We consider first the most common of existing bases in Eastern Europe, which are made of reinforced concrete. The general and subsidiary methodics of research and forecasting efficiency foundations for long life are proposed. These methods are based on laws documents, experimental and calculated data bases of operation of steam turbine power plants. The methodology is to assess the current state of the design for the control parameters. As parameters, according to existing regulations, proposed to use speed vibration, movement or vibration, acceleration vibration. These options are experimental measurements and the results of calculations. Developed methodics of available for use in power plants for existing and new steam turbine foundations.

**Key words:** performance, vibration, forced oscillations, foundation, steam turbine.