

## ВІБРАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ КОРПУСУ ТУРБОАГРЕГАТУ З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВОЇ ЖОРСТКОСТІ ОПОРИ ЗА СПРОЩЕНОЮ МОДЕЛЛЮ

**Красніков Сергій Васильович**, канд. техн. наук, доцент кафедра ДМтаТММ,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: [vsevavr@ukr.net](mailto:vsevavr@ukr.net), ORCID: [0000-0003-1441-9921](https://orcid.org/0000-0003-1441-9921)

Реальний енергоблок електростанції являє собою складну систему турбін і генератора, з'єднаних спільним ротором і фундаментом. Крім цих елементів існують і інші важливі системи та агрегати, але вони не пов'язані єдиним фундаментом і частково або повністю розташовані в інших цехах. Як правило, одна система парової турбіни включає циліндри високого (ЦВТ) і середнього (ЦСТ) тиску, кілька циліндрів низького тиску (ЦНТ), генератор і збудник генератора. Найбільш податливими є виносні опори підшипника ротора низького тиску, конструктивно виконані за одне ціле з корпусом ЦНТ, який спирається на фундамент через плитний балкон. Отже, всі конструктивні елементи корпусу ЦНТ беруть участь в армуванні підшипників ротора. Це принципово відрізняє систему кріплення ротора ЦНТ від роторів ЦВТ, ЦСТ і генератора, підшипникові опори яких спираються безпосередньо на фундамент. Цей підхід не є загальноновизнаним, але реалізований у сотнях реально створених енергоблоків. Багато з них досі працюють.

Чисельні дослідження різних моделей динамічних характеристик елементів системи турбіна-генератор-фундамент, як і подібних систем в цілому, були проведені авторами раніше. Результати натурних випробувань дозволили запропонувати наступну модель турбоагрегату: ЦНТ, що являє собою складну систему оболонок, пластин і стрижнів; фундамент у вигляді системи плит і стрижнів; інше обладнання моделюється у вигляді зосереджених мас.

При проектуванні фундаменту для турбін із самого початку можливий випадковий розкид модуля пружності бетону, пов'язаний із технологією виготовлення, який був фактично вищим на ТЕС і АЕС у минулому столітті у відсутній коаліції. Останнім часом у зв'язку з виснаженням ресурсів більшості електростанцій Європи актуальними є завдання модернізації існуючих електростанцій та використання відновлюваних джерел енергії. Економічно вигідно проводити часткову заміну обладнання; наприклад, залишити старий фундамент для встановлення нової турбіни та генератора. Тому врахування статистичної дисперсії характеристик жорсткості опору є актуальною проблемою у зв'язку з тим, що протягом терміну експлуатації відбуваються тимчасові зміни структури бетону. Це вимагає розгляду жорсткості опори корпусу ЦНТ як випадкової величини.

Скінчено-елементна постановка задачі власних частот системи має вигляд :

$$(\mathbf{K} - p_i^2 \mathbf{M}) \mathbf{V}_i = 0, \quad i = 1 \div n, \quad (1)$$

де  $K$  та  $M$  – матриці жорсткості та маси, відповідно,  $p^2$  – власна частота для натуральної форми.

Для визначення власних частот і форм використовувався метод ітерацій у підпросторі.

При розв'язуванні задачі надійності передбачається, що жорсткість опори тіла на фундамент  $C$  є випадковою величиною, щільність ймовірності якої  $f(C)$  підкоряється нормальному закону з відомими параметрами:  $m_c$  – середнє (номінальне) значення;  $\delta^2_C$  є дисперсія. Максимальне граничне значення  $C$  відповідає жорсткій опорі. Оскільки параметри жорсткості досліджуваної системи є випадковими, спектр власних частот  $\omega_i$  також буде випадковим. Припускається, що в малому околі номінальних значень власних частот  $P_i(m_c)$  як функцію жорсткості  $C$  можна апроксимувати рядом Тейлора зі збереженням лише лінійних членів:

$$\omega_i(C) = \omega_i(m_c) + (C - m_c) \left. \frac{d\omega_i}{dC} \right|_{C=m_c}, (i = 1, \dots, n). \quad (2)$$

У цьому випадку залежність між  $\omega_i$  і  $C$  буде лінійною, а щільності ймовірності власних частот  $f(\omega_i)$  підкорятимуться нормальному закону з математичним сподіванням  $m_{\omega_i}$  і дисперсією  $\delta^2_{\omega_i}$ , які згідно з рівнянням (2) визначаються із співвідношень:

$$m_{\omega_i} = \omega_i(m_c); \quad \delta^2_{\omega_i} = \left[ \left. \frac{dP_i}{dC} \right|_{C=m_c} \right]^2 \delta^2_C \quad (3)$$

Похідна  $dP_i/dC$  визначається за допомогою скінчено-різницевого рівнянь, центральні різниці були використані в цій роботі.

Вібраційну надійність системи при розгляді відмов, які виникають внаслідок власних частот у робочому діапазоні, можна оцінити ймовірністю відмови  $Q_i$ , яка являє собою ймовірність власної частоти в заданому робочому діапазоні:

$$Q_i = P(\omega_H \leq \omega_i \leq \omega_B) = \int_{\omega_H}^{\omega_B} f(\omega_i) d\omega_i \quad (4)$$

На основі креслень реальної парової турбіни створено основу геометричної моделі. Потім методом скінчених елементів була створена розрахункова модель системи. На рис. 1 показана симетрична частина нижньої половини корпусу парової турбіни К-325-25,3 на 1, 2 і 3 потоки.

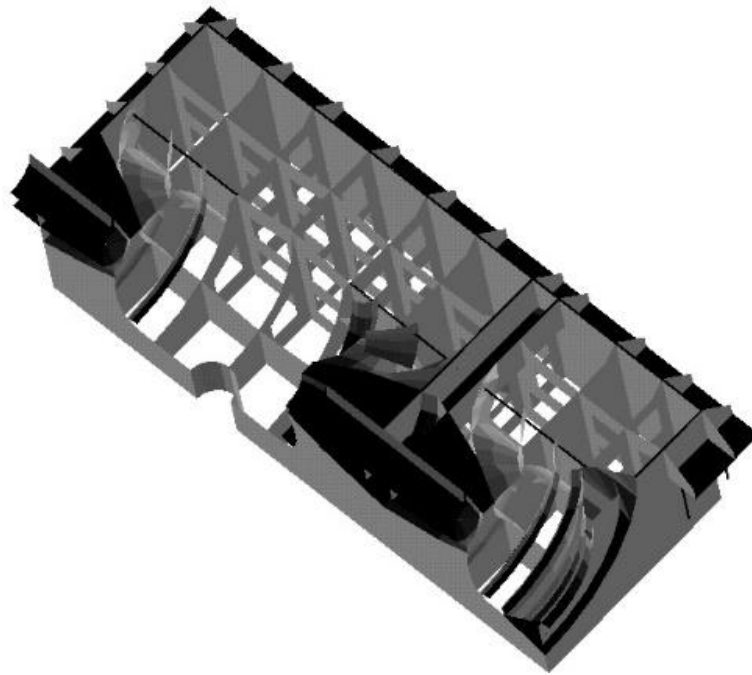


Рисунок 1 - Скінчено-елементна модель

Облік жорсткості тільки нижньої половини корпусу ЦНТ є спрощенням схеми розрахунку. Верхня частина враховується системою мас. Через вісь ротора проходить площина симетрії. Нижні частини ЦНТ всіх потоків виконуються у вигляді єдиного корпусу, тому мають загальний опорний балкон і встановлюються в одну комірку каркасного фундаменту. Крім того, особливістю даної конструкції є єдиний ротор ЦСТ і ЦНТ 1-го потоку, що вимагає моделювання корпусу ЦНТ як оболонки та з'єднання з корпусом ЦНТ в єдину модель. Цей варіант конструкції ЦНТ використовується для всіх турбін типу К-320-240, які встановлювалися на багатьох електростанціях Східної Європи та Азії в 60-80-х роках минулого століття. Майже половина з них уже вичерпали свій проектний ресурс. Остання модифікація цієї серії - турбіна К-325-25,3. Він має такі ж розміри, але більшу потужність і ефективність.

Розрахункова модель (рис. 1) має 3325 скінченних елементів, 3186 вузлів і 19062 ступені вільності. Для моделювання використано квазіоболонкові скінченні елементи у вигляді лінійної комбінації пластин на вигин і плоску напругу. Насправді будівля ЦНТ вільно лежить на фундаменті. Опора на фундамент моделювалася системою жорсткостей, що кріпилися до кожної спеціальної одиниці опорного балкона. Достовірність результатів частотного аналізу заснована на порівнянні з іншою моделлю, яка має 24458 ступенів свободи. Середня похибка значень власних частот становить 6%.

У таблиці 1 наведено значення ймовірності відмови  $Q_i$ , математичного очікування  $m_\omega$ , дисперсії  $\delta_\omega$  та градієнта частоти  $d\omega/dC$  для «глобальних» власних частот ЦНТ при зміні значень жорсткості опори в діапазоні  $10^7 - 10^8$  Н/м<sup>2</sup>. Діапазон робочих частот був прийнятий рівним 48-52 Гц.

Висока ймовірність відмови частоти  $P_8$  в робочому діапазоні (табл. 1). Власна форма цієї частоти (рис. 2) характеризується спільною деформацією вигину та

кручення конструкції в цілому, тому для зміни значення цієї частоти необхідна добудова всієї конструкції.

Таблиця 1 - Характеристики вібраційної надійності ЦНТ

Власні частоти	$Q_i$	$m_\omega$	$\delta_\omega$	$d\omega/dC$
P <sub>1</sub>	3.52E-19	22.06	2.9230	4.497E-8
P <sub>2</sub>	0.00	28.00	0.0950	1.461E-9
P <sub>3</sub>	5.574E-4	33.67	4.4066	6.779E-8
P <sub>8</sub>	0.6128	50.29	2.2683	3.490E-8
P <sub>9</sub>	0.00	57.44	0.2550	3.920E-9
P <sub>13</sub>	4.651E-4	58.71	2.0266	3.118E-8

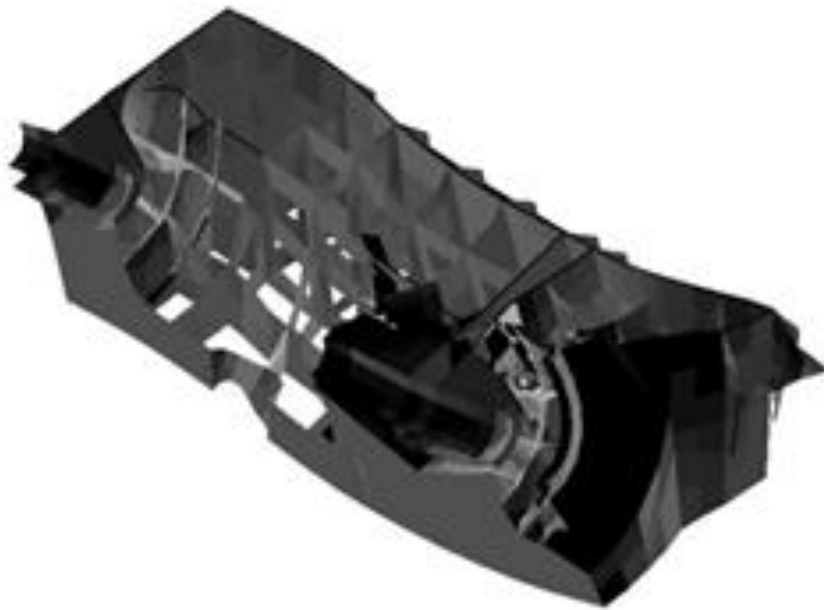


Рисунок 2 – Власна форма коливань на частоті P<sub>8</sub>

### Висновки

Сформульовано математичні моделі для розв'язання задач власних коливань і надійності турбоагрегату з урахуванням випадкових недосконалостей. Завершено побудову геометричної та розрахункової моделей. Серія розрахунків власних частот і форм системи, для яких виконано порівняння з експериментальними даними. Визначено власні частоти в спектрі з високою чутливістю до жорсткості фундаменту, форми якого характеризуються глобальною деформацією всієї системи. Визначено характеристики надійності, які показують високу ймовірність потрапляння окремих власних частот в робочий діапазон. Це може призвести до аварій у досліджуваній системі. Необхідні додаткові дослідження для визначення ефективних заходів їх запобігання.