

О.С. СТЕПЧЕНКО, доцент, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;
О. М. ДУДКІНА, аспірант, НТУ «ХПІ»

МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО РЯДУ КОНСТРУКЦІЙ КОРПУСІВ ЦИЛІНДРА НИЗЬКОГО ТИСКУ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН: Частина 3. Порівняльне дослідження власних частот і форм корпусів ЦНТ «стержневого» типового ряду

На основі параметричної моделі типового ряду визначені власні частоти й форми для двох класів «стержневих» корпусів циліндрів низького тиску. Проведений порівняльний аналіз власних частот і форм між двома класами корпусів та з результатами натурних випробувань.

Ключові слова: параметрична модель, циліндр низького тиску, власні частоти коливань.

На основании параметрической модели типового ряда определены собственные частоты и формы для двух классов «стержневых» корпусов цилиндров низкого давления. Проведен сравнительный анализ собственных частот и форм между двумя классами корпусов и с результатами натурных испытаний.

Ключевые слова: параметрическая модель, цилиндр низкого давления, собственные частоты колебаний.

Based on parametric models the calculated natural frequencies and forms for the two classes case of rod type low pressure cylinder. Comparative analysis of natural frequencies and modes between the two classes of cases and the results of field tests.

Keywords: parametric model, low pressure cylinder, natural frequencies.

Введення. Вібраційний стан системи турбіна-фундамент-основа (ТФО) багато в чому визначає надійність роботи турбоагрегатів ТЕС і АЕС. Найбільш податливим елементом системи, з частин статорів турбоагрегату, є циліндр низького тиску (ЦНТ), який часто викликає підвищення вібрацій в опорах підшипників ротора.

Експериментальні і теоретичні дослідження показали, що динамічні характеристики ЦНТ змінюються залежно від конструкцій ЦНТ і фундаменту [1-3]. Основним недоліком досліджень вібрацій ЦНТ є те, що досліджувалися конкретні конструкції ЦНТ турбоагрегатів, а не весь типовий ряд конструкцій ЦНТ. Авторами розроблено суперелементну параметричну модель типового ряду корпусів ЦНТ ВАТ «ТУРБОАТОМ» [4,5], яка дозволяє провести системні дослідження впливу конструктивних змін корпусу ЦНТ і фундаменту на їх вібраційні характеристики.

У першій половині 80-х років ВАТ «Турбоатом» приступив до випуску типового ряду нової модифікації корпусу ЦНТ, в якому з метою покращення аеродинамічних характеристик вихлопного патрубку замість системи пластин в нижніх половинах патрубків («стільнікова» конструкція) застосована сис-

тема стрижнів («стержнева» конструкція).

На складально-випробувальному стенді ВАТ «Турбоатом» проводилися випробування з метою визначання динамічних характеристик нових ЦНТ і забезпечення відсутності резонансів у вбудованих опор ротора НТ поблизу робочої частоти обертання [5]. Проте експериментальні [1,6] і розрахункові [3,7] дослідження показали підвищену податливість цього типа корпусу і наявність власних частот в робочій частоті. Особливо треба відзначити явище розладу [7] спостережуване в багатокорпусних турбоагрегатів, пов'язане з різною жорсткістю фундаменту для одних і тих же ЦНТ. Це вимагає значного відлаштування власних частот від робочої частоти турбіни. Тому порівняльне дослідження власних частот ЦНД «стержневого» типового ряду актуально і поважно для проектування нових типів турбін.

Постановка задачі. На основі параметричної структурною СЕ-моделі типового ряду ЦНД провести розрахункові дослідження власних частот і форм для двох класів ЦНТ «стержневого» типового ряду. Оцінити достовірність моделі і результатів шляхом порівняння з експериментальними даними, отриманими в результаті натурних випробувань на складально-випробувальному стенді ВАТ «Турбоатом».

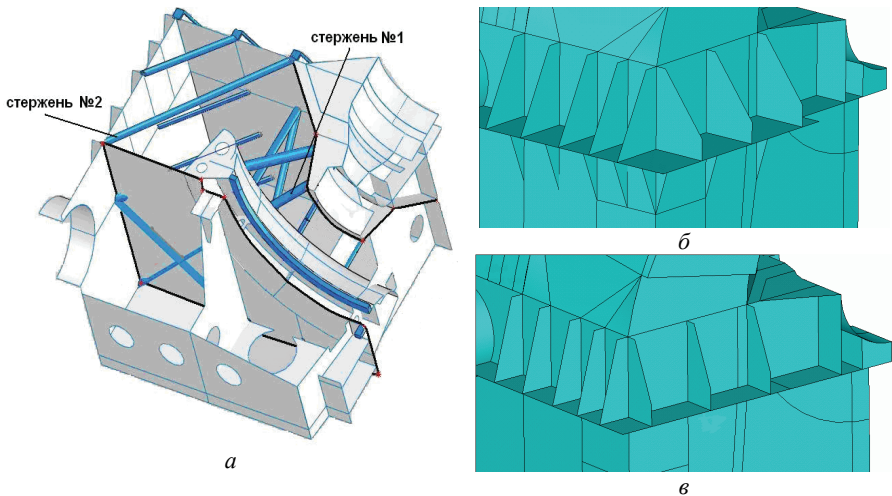


Рисунок 1 – Конструкція нижньої частини корпусу «стержневого» ЦНТ:
а – нижня частина корпусу (1/4 частина); б – вид на балкон ЦНТ К-240-4,0;
в – вид на балкон ЦНТ К-320-23,5)

Дослідження власних частот і форм корпусів ЦНТ «стержневого» типа. Для аналізу власних частот і форм типового ряду «стержневих» ЦНТ були узяті турбоагрегати К-320-23,5 і К-240-4,0 з однотипними корпусами (рис. 1, а), які мали наступні відмінності:

- різна ширина балкона – полиці, яка опоясує корпус ЦНТ паралельно

горизонтальному роз'єму і призначена для спирання ЦНТ на фундамент (рис. 1, б, в);

– наявністю підкріплюючих косинок під балконом (рис. 1, в).

На основі параметричної суперелементної моделі корпусів ЦНТ «стержневого» типа, розробленою раніше [4,5] були побудовані скінчено-елементні моделі ЦНТ двох турбін К-320-23,5 і К-240-4,0, які приведені на рис. 2. У моделях враховані лише маси конденсатора і обойми, ротор не враховувався, оскільки на випробувальний стенд він не встановлюється. Фундамент враховувався у вигляді усередненої жорсткості в точках, де на нього спирається балкон корпусу.

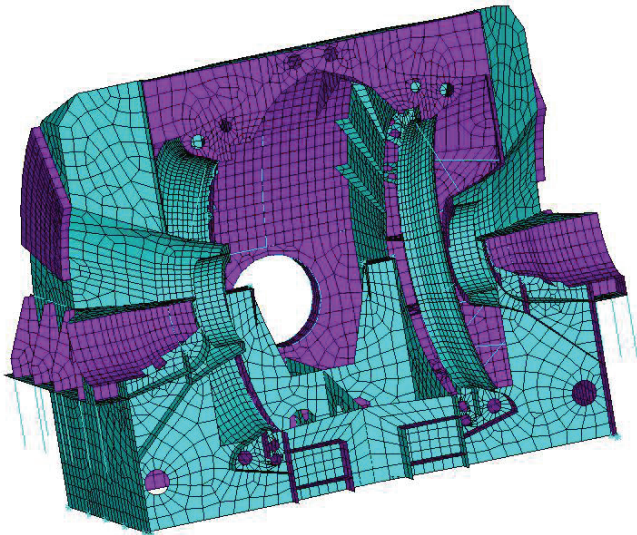


Рисунок 2 – КЕ-модель «стрижньового» корпусу ЦНТ турбіни (1/2 частина)

У табл. 1 приведені власні частоти для двох моделей «стержневих» ЦНТ: турбіни К-320-23,5 і К-240-4,0 в діапазоні від 10 до 60 Гц. Як видно з табл. 1, є розбіжності власних частот різних турбін ЦНТ. Причини цієї розбіжності пояснені нижче, при аналізі власних форм турбоагрегатів.

Власні частоти таких складних конструкцій, як турбоагрегат зручно розділити для аналізу на дві групи [3] по характеру деформацій, які домінують у власній формі:

- глобальні – визначаються інтенсивною деформацією всього корпусу ЦНТ;
- локальні – визначається деформаціями окремих елементів конструкції ЦНТ (пластини або стержні).

Власні форми приведені у вигляді кольорових та векторних діаграм переміщень (рис. 3-9) на скінчено-елементній моделі деформованої конструкції. Інтенсивність амплітуд переміщень відображена різними відтінками сірого

кольору. Темно сірий колір відповідає відсутності амплітуд, світло сірий їх максимуму.

Таблиця 1 – Власні частоти «стрижньових» турбоагрегатів

№ частоти	К-320-23,5	К-240-4,0	Тип форми
1	12,488	12,418	Локальна (стінка ЦНТ)
2	15,733	15,147	Глобальні
3	18,101	17,858	
4	27,079	26,932	Локальна (стрижень №1)
5	27,159	27,008	
6	29,662	29,352	
7	29,914	29,809	
8	33,408	32,442	Глобальна
9	39,123	39,126	Локальні (стрижень №2)
10	39,163	39,163	
11	39,233	39,232	
12	39,276	39,272	
13	50,050	49,903	Глобальні
14	56,469	56,896	
15		59,447	Локальна (косинка)

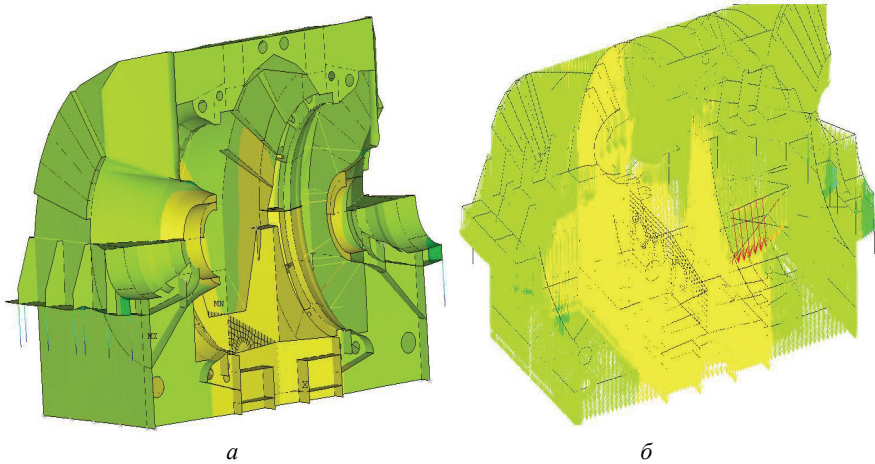


Рисунок 3 – Глобальна власна форма на частоті p_2

На рис. 3-7 приведені глобальних форм для «стержневих» моделей ЦНТ в діапазоні 10-65 Гц. Форми глобальних частот для обох турбоагрегатів практично співпадають, тому наведені форми тільки для турбіни К-240-4,0 у двох варіантах: *a* – кольорових діаграм розподілу переміщень по амплітуді; *b* – векторних діаграм з показом напрямку руху.

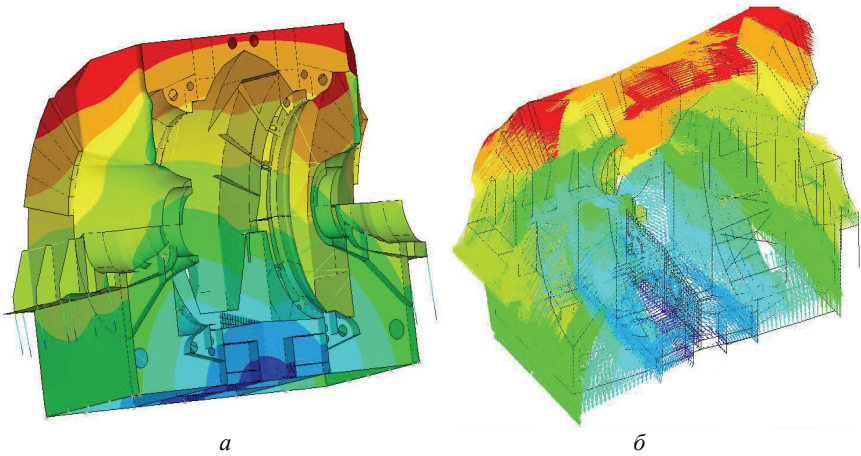


Рисунок 4 – Глобальна власна форма на частоті p_3

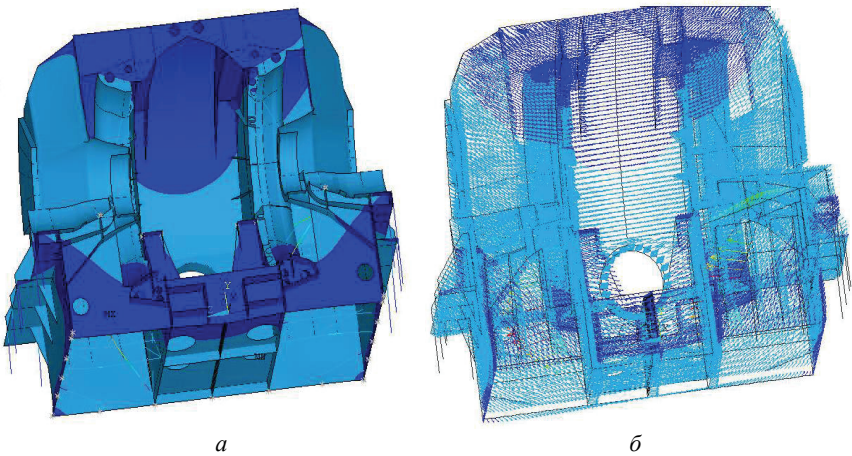


Рисунок 5 – Глобальна власна форма на частоті p_8

Аналіз діаграм переміщень приведених на рис. 3-7 показує, що:

- перша глобальна форма коливань (див. рис. 3, p_2) визначається вертикальними переміщеннями всього ЦНТ як єдиного цілого (маса на пружині). Відмінності між ЦНТ К-320-23,5 і К-240-4,0 в тому, що в останнього вертикальні переміщення ЦНТ практично однакові, тоді як в К-320-23,5 є деяке збільшення вертикальних переміщень в нижній частині. Це пов'язано з менш жорстким опорним балконом в останнього;
- друга глобальна форма коливань (див. рис.4, p_3), визначається інтенсивними горизонтальними переміщеннями кришки корпусу ЦНТ, але

при цьому деформується весь ЦНТ і при цьому переміщення всього корпусу відбувається синфазно;

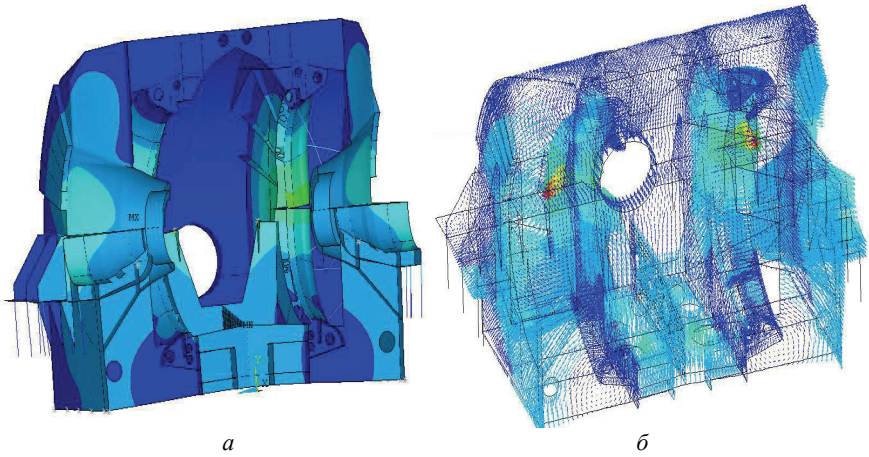


Рисунок 6 – Глобальна власна форма на частоті p_{13}

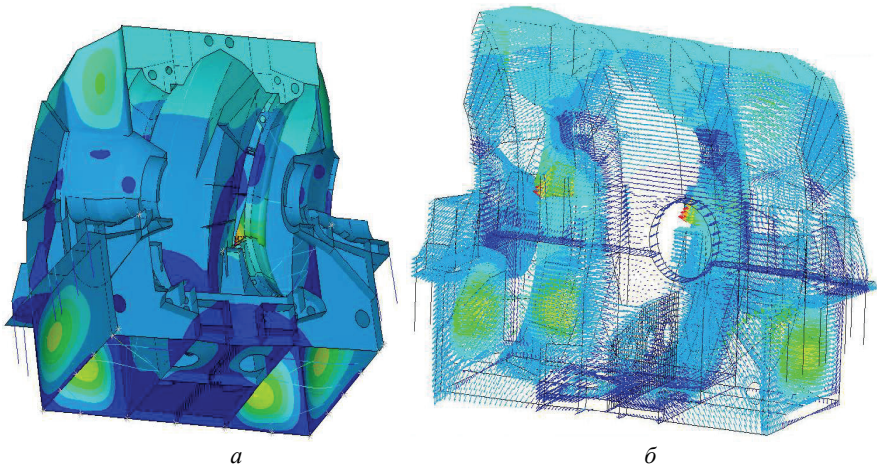


Рисунок 7 – Глобальна власна форма на частоті p_{14}

- третя глобальна форма (див. рис. 5, p_8) визначається невеликими деформаціями всього корпусу ЦНТ, та інтенсивними коливаннями стержнів № 1 та № 2;
- четверта глобальна форма (див. рис. 6, p_{13}) є найбільш небезпечною, оскільки її власна частота більше 49,9 Гц знаходиться в робочому діапазоні частот обертання ротора турбоагрегату і визначається подовжніми (уздовж осі ротора) переміщеннями тією частиною дифузора, яка приєднана

- до кришки корпусу в обох ЦНТ. При цьому, дифузор через вертикальну підкріплюючу стінку збуджує і опори підшипника ротора;
- п'ята глобальна форма (див. рис. 7, p_{14}) визначається деформаціями згину оболонки кришки корпусу і стінок центральної частини корпусу ЦНТ, та інтенсивними деформаціями скруту центральної частини дифузора. При цьому більших рух кришки збуджує коливання торцевих стінок конуса підшипника. Частота цієї форми теж близька до робочої.

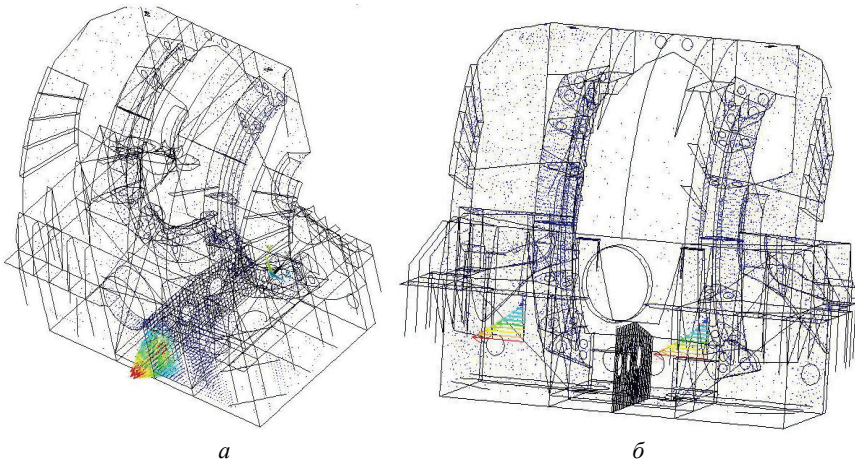


Рисунок 8 – Локальні власні форми коливань стінок ЦНТ: *a* – на частоті p_1 ; *б* – на p_{15} - p_{17})

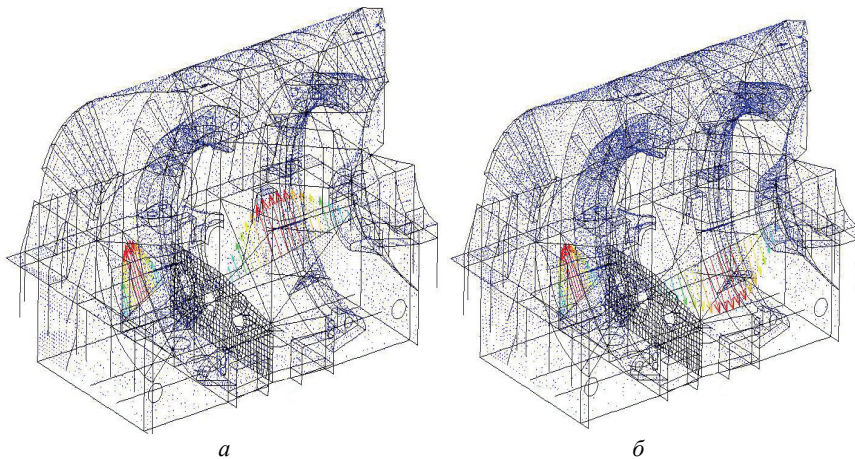


Рисунок 9 – Локальні форми коливань стержня №1 на частотах p_4 і p_5 : *a* – антифазні; *б* – синфазні коливання;

Локальна власна форма на частоті p_1 визначається деформацією бічної стінки нижньої половини корпусу ЦНТ біля паровпуску (див. рис. 8, а). Власні форми на частотах p_{15} , p_{16} і p_{17} для турбіни К-240-4,0 визначаються коливаннями підкріплюючої косинки під балконом з боків корпусу (див. рис. 8, б).

Власні форми на частотах p_4 , p_5 , p_6 і p_7 визначаються коливаннями нижнього стрижня № 1. Стрижені коливаються по першій власній формі синфазно (див. рис. 9, а) та у протифазі (див. рис. 9, б). Власні форми на частотах p_9 - p_{12} визначаються коливаннями згину нижнього стрижня № 2 кришки ЦНТ по першій власній формі.

Зіставлення результатів розрахункових і експериментальних досліджень власних частот для «стрижньових» конструкцій ЦНТ. Динамічні характеристики опор РНТ і корпусів ЦНТ на складально-випробувальному стенді заводу знаходилися шляхом послідовного збудження коливань у вертикальному і поперечному напрямках з одночасною реєстрацією параметрів коливань в різних точках ЦНТ і стендового фундаменту. Устаткування для збудження коливань системи «ЦНТ з вбудованими опорами РНТ - фундамент – основа» складається з механічного віброзбудника, електродвигуна, вкладки, тиристорного блоку управління і регулювання частоти віброзбудження конструкції ВАТ «Турбоатом». Робочий діапазон регулювання частоти обертання віброзбудника при випробуваннях складав 15 до 58,4 Гц. Пристрій забезпечує можливість плавного регулювання частоти обертання з точністю до 0,03-0,08 Гц в робочому діапазоні. В результаті випробувань для обох ЦНТ були отримані амплітудно - частотні характеристики (АЧХ) в двох точках на опорі підшипника ротору. Шаг по частоті при випробуваннях був - 0,8 Гц.

Для одержання значень експериментальних резонансних частот з АЧХ було використано статистичний метода обробки результатів експерименту [8]. Розглядаючи значення частоти p_E , як випадкову величину, для обробки результатів використано центральна гранична теорема теорії ймовірностей [8], відповідно до якої наближеним значенням шуканої величини p_E буде середне-арифметичне значення вимірів частоти в декількох незалежних точках:

$$p_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_E^i. \quad (1)$$

де p_E^i – значення частоти в точці i при експерименті.

В якості оцінки погрішності було взято стандартне відхилення s [8]:

$$s = \sqrt{Dp_E}; \quad Dp_E = \frac{1}{n} Dp_E^i; \quad Dp_E^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_E^i - p_E)^2, \quad (2)$$

де Dp_E – розподілена дисперсія, Dp_E^i – дисперсія.

Остаточо вираження для оцінки погрішності таке:

$$s = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_E^i - p_E)^2}. \quad (3)$$

В нашому експерименті значення були взяті з двох точок, тому $n = 2$. В результаті обробки АЧХ згідно (1,3) були отримані значення частот p_E та стандартних відхилень S , які наведені у табл. 2. Розрахункові глобальні власні частоти відповідні до резонансних частот, отриманих в результаті обробки АЧХ (табл. 2), а також абсолютна погрішність δ_A та відносна погрішність δ_O приведена в табл. 3.

Таблиця 2 – Експериментальні частоти і відхилення для ЦНТ турбін К-320-23,5 та К-240-4,0

№ резонансної частоти	К-320-23,5		К-240-4,0	
	p_E	S	p_E	S
1	16,7	0,0	16,7	0,0
2	20,0	0,6	20,0	0,6
3	32,5	0,3	33,3	0,6
4	50,0	0,0	50,8	0,5
5	58,3	1,8	53,3	0,0

Таблиця 3 – Розрахункові та експериментальні частоти ЦНТ

№ глобальної частоти	К-320-23,5				К-240-4,0			
	Роз.	Екс.	δ_A	δ_O (%)	Роз.	Екс.	δ_A	δ_O (%)
p_2	15,7	16,7	1,0	6,3	15,2	16,7	1,5	9,8
p_3	18,1	20,0	1,9	10,5	17,9	20,0	2,1	11,7
p_8	33,4	32,5	0,9	2,7	32,5	33,3	0,8	2,5
p_{13}	50,1	50,0	0,1	0,2	49,9	50,8	0,9	1,8
p_{14}	56,5	58,3	1,8	3,1	56,9	53,3	3,6	6,3

Зіставивши експериментальні і розрахункові частоти (табл. 3) можна відзначити добрий збіг власних частот для всіх частот, крім частоти p_8 , де відносна погрішність перевищує 10 %. Більш інформативною є абсолютна погрішність, тому що шаг по частоті, при визначанні АЧХ під час випробувань був 0,8 Гц. Порівняння абсолютної погрішності з шагом, з урахуванням впливу тертя і відхилення (табл. 2), говорить що всі розрахункові частоти крім p_{14} добре збігаються з експериментальними значеннями.

Чимала розбіжність на частоті p_{14} , абсолютна погрішність якої для К-320-23,5 складає 1,8 Гц, а для К-240-4,0 досягає 3,6 Гц, говорить о можливим впливе самого випробувального стенду. Випробувальний стенд є сталеву рамною конструкцією, і при приєднанні до нього корпусу ЦНТ може змінювати свої власні частоти і податливість в місцях опору ЦНТ. Тому для уточнення причин цієї розбіжності необхідно провести додатковий аналіз на моделі стенд - корпусу ЦНД.

На робочій частоті p_{13} слід зазначити вдалий збіг розрахункових і експериментальних даних, абсолютна погрішність для К-320-23,5 складає 0,2 Гц, а для К-240-4,0 – 0,9 Гц.

Висновки. З аналізу власних частот і форм слідує, що ЦНТ «стержневого типу» має густий спектр власних частот в діапазоні від 10 до 60 Гц, і при цьому одна власна частота лежить в районі робочої частоти турбіни – 50 Гц.

При зіставленні експериментальних даних з результатами розрахунків визначено, що розбіжності знаходяться в межах технічної погрішності, що говорить про достовірність побудованої моделі.

Дана модель може бути використана як для визначення динамічні характеристик ЦНТ на стадії проектування, так і для оптимізації конструкції ЦНТ.

Список літератури: 1. Рабинович Э.М., Виноградов Н.Н. Исследование деформационного состояния ЦНД К-500-65/3000 в эксплуатации на ЛАЭС и ЦНД К-220-44-3 на Кольской АЭС. (Часть II. Кольской АЭС). Отчет ЦКТИ. – Л.: 1989. 2. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат-фундамент. – К.: Научная мысль, 1991. – 232 с. 3. Степченко А.С. Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент. Дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Харьк. Гос. политех. ун-тет. 1994. – 194 с. 4. Дудкина Е.Н., Степченко А.С. Моделирование типового ряда конструкций корпусов цилиндра низкого давления мощных паровых турбин: Часть I. Классификация и разработка структурной схемы // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2009. – № 42. – С.147-154. 5. Степченко А.С., Дудкина Е.Н., Соболев В.А. Моделирование типового ряда конструкций корпусов цилиндра низкого давления мощных паровых турбин: Часть II. Построение параметрической КЭ - модели для исследования динамических характеристик // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2011. – № 63. – С.113-121. 6. Орлов И.И., Приходько В. В., Явельский М.Б. Определение на стенде ОАО «Турбоатом» вибрационных характеристик ЦНД быстроходных турбоагрегатов для АЭС. Отчет № 046116/0-11357, НПО ЦКТИ – ОАО «Турбоатом», 1982. – 138 стр. 7. Степченко А, Красніков С., Торянік О. Комп'ютерне моделювання багатокорпусного турбоагрегата у системі турбоагрегат – фундамент – основа // Машинознавство. – Л.: КІНПАТРІ ЛТД, 2009. – № 2 (140). – С. 27-33. 8. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978. – 512 с.

Надійшла до редакції 18.12.12