

С. Красніков

Доцент, канд. техн. наук

О. Степченко

Доцент, канд. техн. наук

О. Торянік

Аспірант

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний
інститут», м. Харків

УДК 539.534

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКОРПУСНОГО ТУРБОАГРЕГАТУ Й АНАЛІЗ ЙОГО ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Сайт: www.naukariv.com
адреса: м. Харків, вул. Харківська, 14. Контактні дані:
телефон: +380 372 502 502, факс: +380 372 502 502, електронна пошта: info@naukariv.com

вібрація, коливання, турбоагрегат, фундамент, метод скінченних елементів

Україна має велику кількість теплових і атомних електростанцій, які при роботі на повну потужність здатні виробляти електроенергію більше, ніж потрібно для внутрішнього споживання. Таким чином, Україна має потенційне джерело експортного товару у вигляді електроенергії. Однак більшість устаткувань електростанцій має великі терміни експлуатації та вимагає заміни. Особливі проблеми викликає модернізація турбоагрегатів. При цьому нове обладнання встановлюють на старий фундамент. Оскільки система турбоагрегат — фундамент — основа (ТФО) взаємозалежна, це може призвести до збільшення рівня вібрації і виходу робочих параметрів турбіни за межі допустимих величин. Особливо це характерно для багатокорпусних турбоагрегатів великої потужності, які мають підвищену податливість. Тому дослідження вібраційних характеристик таких агрегатів є актуальним завданням.

Об'єктом дослідження є система турбоагрегат — фундамент для турбіни потужністю 500 МВт. Вона складається із залізобетонного фундаменту довжиною понад 60 метрів, турбіни, генератора, збудника генератора.

Турбіна містить у собі п'ять корпусів, з яких чотири корпуси циліндрів низького тиску (ЦНТ) є однаковими коробчастими конструкціями з габаритами 8×96 метрів і складаються з металевих пластин, оболонки, стрижнів і труб, а п'ятий корпус циліндра високого тиску (ЦВТ) являє собою тверду металеву конструкцію, за формою близьку до циліндричної. У чотирьох корпусах ЦНТ вбудовані опори роторів, вони найподатливіші й вимагають детального моделювання. П'ятий корпус досить жорсткий, при роботі турбіни коливається як єдине ціле і може моделюватися як система зосереджених мас. Всі корпуси турбіни і генератор з'єднані єдиними валопроводами.

Постановка задачі. При модернізації турбоагрегату типу К-500 були проведені експериментальні дослідження вібраційних характеристик і виявлені небезпечні коливання стінок кришки ЦНТ на робочих частотах роботи турбіни.

Головна мета цієї статті — виявлення причин коливань кришки ЦНТ для турбоагрегатів типу К-500 і пошук шляхів конструктивної модернізації системи з метою недопущення або мінімізації амплітуд коливань.

Для проведення досліджень був використаний метод скінченних елементів, що добре зарекомендував себе при розв'язуванні задач статичної та динамічної для таких різноманітних конструкцій зі складною геометрією, як система турбоагрегат — фундамент. Була побудована скінченно-елементна модель системи ТФО з докладним моделюванням найчутливіших до вібрацій корпусних конструкцій турбіни. Ці конструкції були змодельовані за допомогою оболонкових, стрижневих і масових скінченних елементів. Побудовані моделі корпусів детально описують геометрію реального об'єкта.

Для побудованої скінченноелементної моделі були проведені розрахунок таких вібраційних характеристик: власних частот і форм коливань системи; амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) системи в небезпечних точках. На базі отриманих вібраційних характеристик був проведений аналіз, що дав можливість визначити джерело появи небезпечних коливань, а також можливість модернізації конструкції з метою їхнього усунення.

Моделювання компонентів системи ТФО. Корпус ЦВТ турбіни, валопровід, генератор і збудник генератора моделювалися у вигляді системи мас. Заповнений водою конденсатор ЦНТ моделювався за допомогою кінематичних обмежень і системи мас.

Окрема увага була приділена скінченноелементному моделюванню корпусу ЦНТ, що складається з корпусної частини і кришки, геометрія яких наведена на рис. 1 і рис. 2 відповідно.

Оскільки підвищені вібрації спостерігалися на кришці корпусу ЦНТ, були запропоновані різні схеми підвищення жорсткості кришки. Конструкція корпусу ЦНТ у всіх варіантах залишалася без змін. Як показав первинний аналіз вихідної конструкції, причиною коливань зовнішньої частини кришки є коливання внутрішньої стінки кришки. З метою усунення цих коливань було запропоновано кілька варіантів підвищення жорсткості конструкції внутрішньої стінки ребрами жорсткості і розпіральними брусами.

У цій статті проілюстроване технічне рішення для найвдалішої розрахункової геометричної моделі корпусу ЦНТ з модернізованих варіантів, конструкція якої наведена на рис. 3. В моделі додані: короби на торцевій стінці, що підкріплює стрижні, чотири косинки на внутрішній

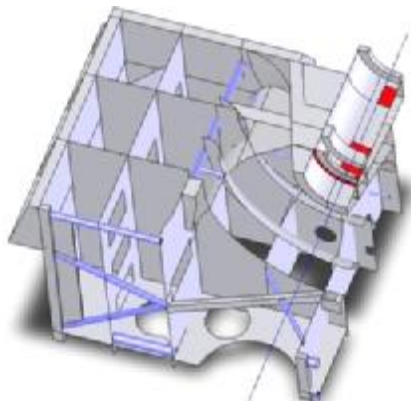


Рис. 1. Нижня частина корпусу турбіни К-500, 1/4

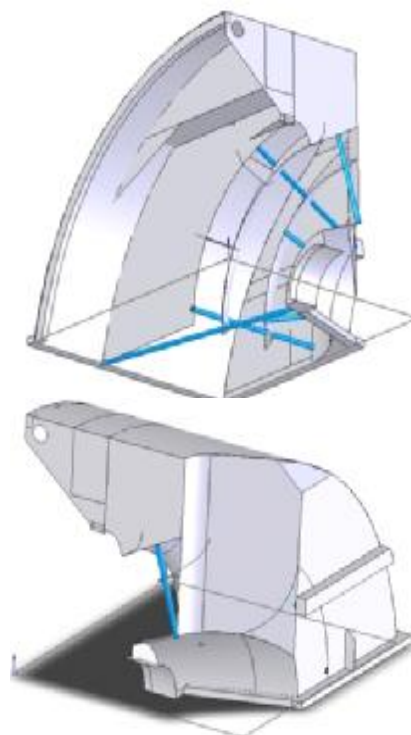


Рис. 2. Четвертина кришки корпусу турбіни К-500 (вихідна конструкція)

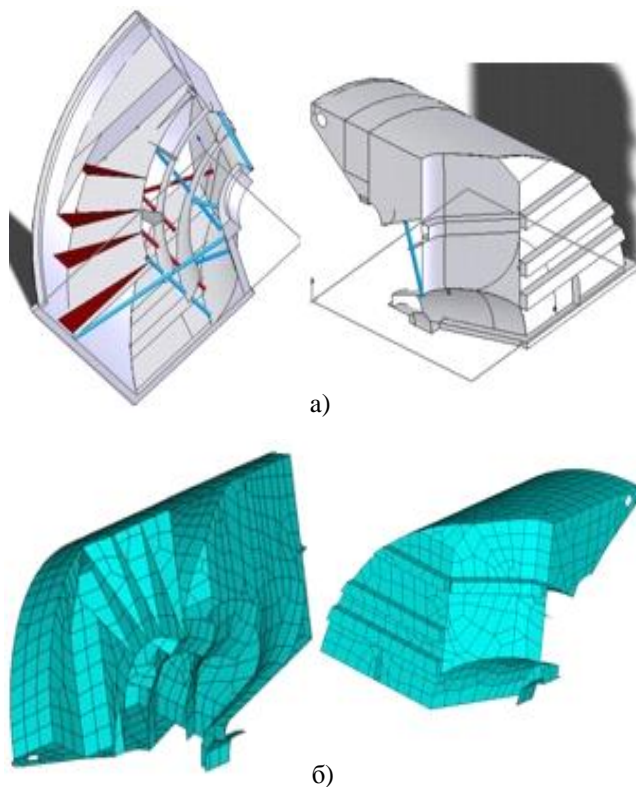


Рис. 3. а — четвертина кришки корпусу турбіни К-500 (модернізована конструкція з жорсткістю); б — скінченно-елементна модель четвертини кришки корпусу турбіни К-500 (модернізована конструкція з жорсткістю)

стілці кришки корпусу ЦНТ і проміжні розпіральні стрижні всередині.

На основі скінченноелементних моделей 1/4 частини ЦНТ тиражуванням отримані чотири половини ЦНТ, які надалі приєднані до фундаменту. При цьому передана на ЦНТ маса конденсатора, обойма і ротор враховані як зосереджені маси.

Обрана схема моделювання системи ТФО була апробована в попередніх дослідженнях для однокорпусних турбоагрегатів [1, 4]. Особливістю досліджуваної моделі системи ТФО є врахування спірання двох корпусів турбіни на один ригель фундаменту. Для цього було проведено окреме дослідження фундаменту і підібрана оптимальна пластинчато-стрижнева модель фундаменту, що має адекватні жорсткісні та інерційні характеристики стрижневої моделі, апробованої в попередніх працях [2, 3]. Схема скінченноелементної моделі фундаменту подана на рис. 4, де прямими позначені осьові лінії балкових елементів, заштрихованими площинами A1, A2, A3, A4 — ригелі, які моделюються пластинчастими елементами для врахування спірання двох корпусів на один ригель.

Оскільки інше устаткування або має дуже високу жорсткість (ЦВТ, збудник генератора), або його жорсткість не впливає на коливання ЦНТ, його можна замінити зосередженими масами в місцях спірання на фундамент [5, 6].

Система турбоагрегат — фундамент для турбіни К-500 має одну площину симетрії, тому для дослідження коливань досить було змоделювати симетричну частину системи [5]. Побудована скінченноелементна модель симетричної частини системи ТФО наведена на рис. 5, а. У ній були використані скінченні елементи маси, стрижня і пластини-оболонки [6]. На рис. 5, б наведена збільшена частина моделі — симетрична 1/4 частини ЦНТ для 1-ї та 2-ї моделі кришки корпусу ЦНТ.

Аналіз вібраційних характеристик системи. Для побудованої моделі системи ТФО проведені числові дослідження таких вібраційних характеристик у районі оборотної (50 Гц) і подвійної оборотної (100 Гц):

- аналіз власних частот;
- аналіз власних форм;
- аналіз амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) вимушених коливань.

Власні частоти і форми є об'єктивними характеристиками системи, які показують можливі резонанси і

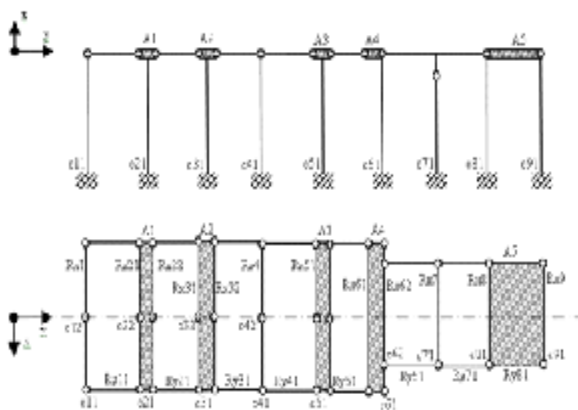


Рис. 4. Схема моделі фундаменту турбіни К-500, спроектована з можливістю врахування спірання двох корпусів ЦНТ на ригель

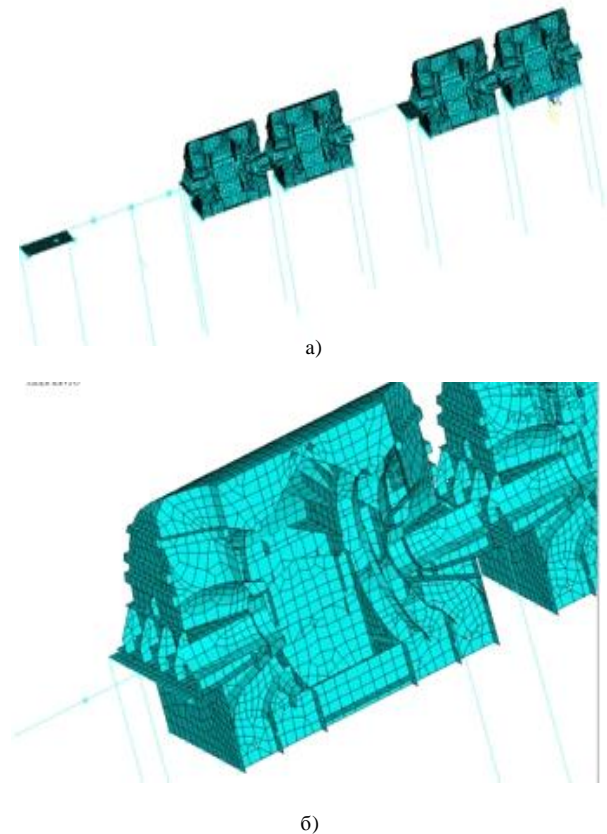


Рис. 5. Скінченноелементна модель симетричної частини турбіни К-500 (а) і її збільшена частина з моделлю ЦНТ (б)

форму деформації конструкцій системи на заданому резонансі. Жорсткість елементів конструкції, що міняють форму на власній частоті, змінює як власну форму (тобто місце максимумів амплітуд), так і дає зсув власної частоти. Дослідження власних частот і форм системи турбоагрегат — фундамент і визначило схеми підвищення жорсткості кришки корпусу ЦНТ.

Власні частоти системи турбоагрегат — фундамент можна розділити на глобальні й локальні [5] за власною формою коливань. Дослідження форм коливань показало, що частина з них визначається інтенсивною деформацією всієї системи або окремих її конструкцій (фундаменту, ЦНТ) як єдиного цілого. Частоти і форми, що відповідають такій деформації будемо називати глобальними. Інша частина форм коливань визначається деформаціями окремих елементів конструкцій (окремі ригелі або колони фундаменту, окремі пластини або стрижні ЦНТ). Частоти і форми відповідної такої деформації називатимемо локальними.

Амплітудно-частотна характеристика визначалася під дією одиничного вертикального навантаження $P=1$ Н, прикладеного в місцях спірання підшипника ротора на вбудовані опори ЦНТ, що моделювала одиничний небаланс ротора ЦНТ. Ця характеристика визначає амплітуди коливань при впливі гармонійного навантаження із заданою частотою. При розрахунку використовувався логарифмічний коефіцієнт загасання коливань $\delta=0,05$. Місце прикладення навантаження і напрям наведені на рис. 6 для ЦНТ-2, аналогічно були прикладені навантаження й для інших ЦНТ.

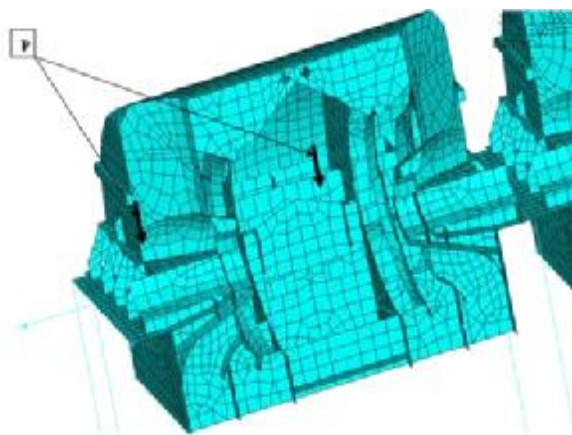


Рис. 6. Місце і напрям прикладення навантаження при розрахунку АЧХ

У табл. 1 наведені власні частоти в районі оборотної частоти 50 Гц для двох моделей системи турбоагрегат-фундамент: вихідна конструкція ЦНТ (модель 1) і модифікована конструкція ЦНТ (з підвищеною жорсткістю, модель 2). Як видно з табл. 1, система має досить щільний спектр власних частот, що при жорсткості принципово не міняється — відбувається збільшення значень частот на 0,1 — 0,4 Гц.

Власні форми для вихідної конструкції наведені на рис. 7 — рис. 8, де подано вид ЦНТ з максимальними деформаціями. З рисунків видно, що для всіх власних частот спостерігається глобальна форма деформації окремих ЦНТ: на рис. 7 спостерігається деформація за першою глобальною формою ЦНТ-1 (максимум на опорній стінці обойми); на рис. 8 спостерігається деформація за другою глобальною формою ЦНТ-3 і за першою ЦНТ-4 (максимум на опорній стінці обойми та внутрішній стінці кришки корпусу ЦНТ).

Також в усіх випадках інтенсивно деформуються торцеві стінки кришки корпусу ЦНТ. Крім цього, спостерігаються інтенсивні деформації окремих колон і ригелів

Таблиця 1

Власні частоти для системи турбоагрегат — фундамент у діапазоні 48 — 52 Гц

№	Власні частоти, Гц	
	Модель 1	Модель 2
1	48.493	48.537
2	49.030	49.227
3	49.210	49.405
4	49.434	49.624
5	50.235	50.270
6	50.951	50.790
7	51.156	51.166
8	51.515	51.272
9	51.769	51.762
10	52.339	52.308

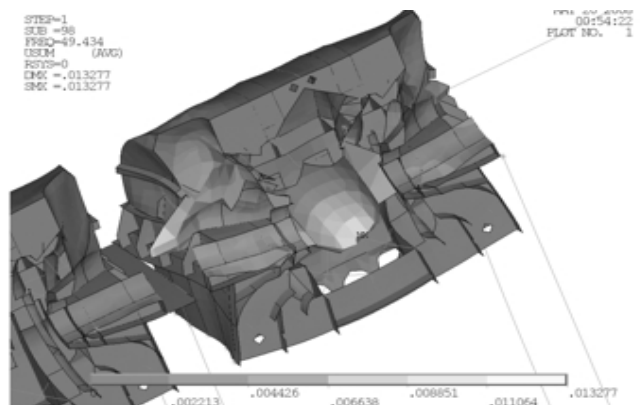


Рис. 7. Власна форма коливань на частоті $\rho=49,434$ Гц для вихідної моделі

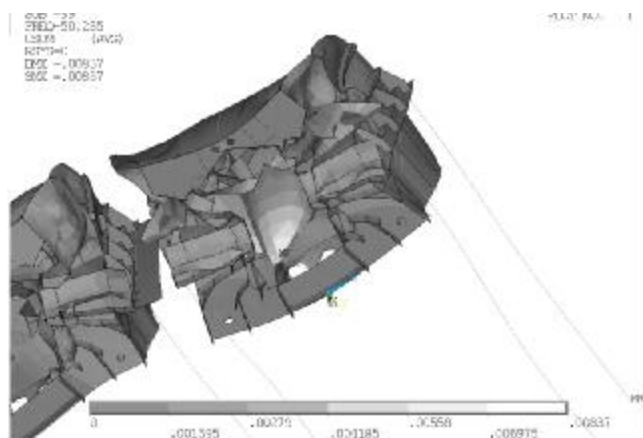


Рис. 8. Власна форма коливань на частоті $\rho=50,235$ Гц для вихідної моделі

фундаменту, на які спираються ЦНТ, з максимальними деформаціями. Тому в модернізованому варіанті моделі здійснено підвищення жорсткості торцевої стінки ЦНТ коробами і стрижнями, а внутрішньої стінки кришки корпусу ЦНТ — косинками.

Власні форми для модифікованої конструкції наведені на рис. 9 — рис. 10 тільки з видом на ЦНТ з максимальними деформаціями, тому що принципових змін на виді в цілому не відбулося. Власні частоти при цьому підвищилися на 0,1 Гц стосовно моделі 3 і, як і раніше, для всіх власних частот спостерігаються ті ж глобальні форми деформації окремих ЦНТ. При цьому максимум деформацій перейшов на стінку опори під обоймою в нижній половині ЦНТ (рис. 9 — рис. 10).

З метою оцінення вибраного варіанта підвищення жорсткості ЦНТ були проведені дослідження амплітудно-частотних характеристик у точках на опорах підшипників і на торцевих стінках кришки ЦНТ, де спостерігалися максимуми при експериментальних вимірах. На рис. 11 проілюстровано АЧХ для вихідної моделі (на легенді — модель 1) і модифікованої моделі (модель 2). На прикладі опори підшипника №10, як показано на рис. 11,

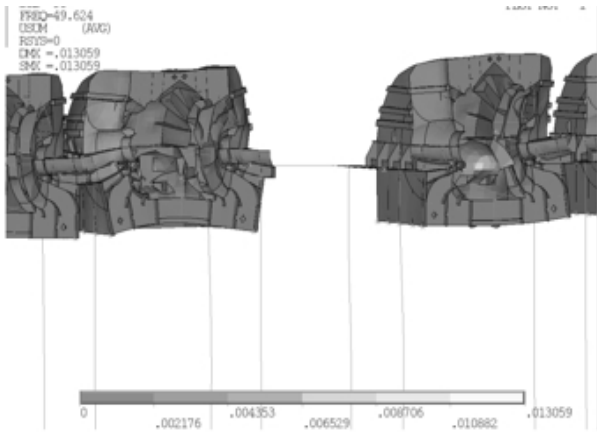


Рис. 9. Власна форма коливань на частоті $p=49,62$ Гц для модернізованої моделі з жорсткістю

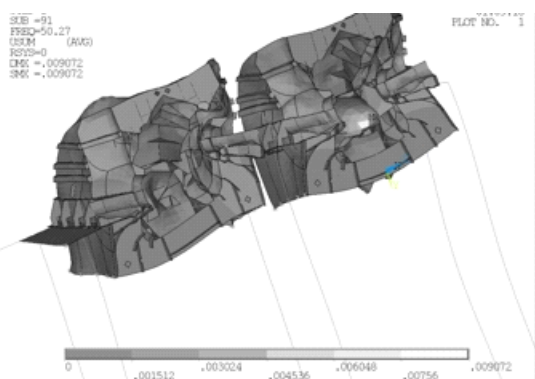


Рис. 10. Власна форма коливань на частоті $p=50,27$ Гц для модернізованої моделі з жорсткістю

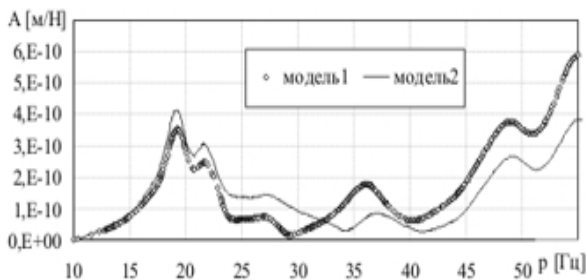


Рис. 11. Амплитудно-частотні характеристики вертикальних переміщень у точці опори підшипника №10 для всіх моделей циліндрів низького тиску

модифікована конструкція сприятливо позначається на інтенсивності коливань у небезпечних точках на робочій частоті.

З порівняння АЧХ опор підшипників різних моделей ЦНТ можна бачити зміну амплітуди коливань на робочій частоті. Але при цьому треба відзначити, що якщо для ЦНТ-2 і ЦНТ-1 підвищення жорсткості ЦНТ дає зниження рівня вібрацій на опорі підшипника, то для ЦНТ-3 і ЦНТ-4 ніяких змін рівня вібрацій не спостерігається. Резонанс

у районі 50 Гц визначається глобальною власною формою коливань системи і для модифікованої кришки ЦНТ величину практично не міняє. Як показує практика раніше проведених розрахунків [5, 6], таке можливо якщо спостерігається локальний резонанс фундаменту на робочій частоті. Тому були проведені дослідження форм коливань фундаменту (у системі турбоагрегат — фундамент) і АЧХ у точках ригелів №5 і №2 під полицьками вбудованих опор підшипника ЦНТ. На рис. 12 наведена форма коливань фундаменту на глобальній власній частоті $p=47,11$ Гц, з якого видно, що фундамент має локальну деформацію в колонах і ригелях під ЦНТ-2 і ЦНТ-1. На рис. 13 наведена форма коливань фундаменту на глобальній власній частоті $p=50,27$ Гц, з якого видно, що фундамент має локальну деформацію в колонах і ригелях під ЦНТ-4 і ЦНТ-3

На рис. 14 наведено АЧХ для ригелів №5 і №2, з якого видно, що ця форма визначає глобальний резонанс для ригеля №2 фундаменту на частоті 50 Гц і глобальний резонанс для ригеля №5 фундаменту на частоті 47 Гц, що відповідно визначає глобальні резонанси для опор підшипників.

Окрема увага була приділена аналізу власних частот у районі подвійної оборотної частоти 100 Гц для двох моделей системи турбоагрегат — фундамент (табл. 2): вихідна конструкція ЦНТ (модель 1); модифікована фінальна конструкція ЦНТ (модель 2). Як видно з таблиці,



Рис. 12. Власна форма коливань фундаменту на частоті $p = 47,11$ Гц

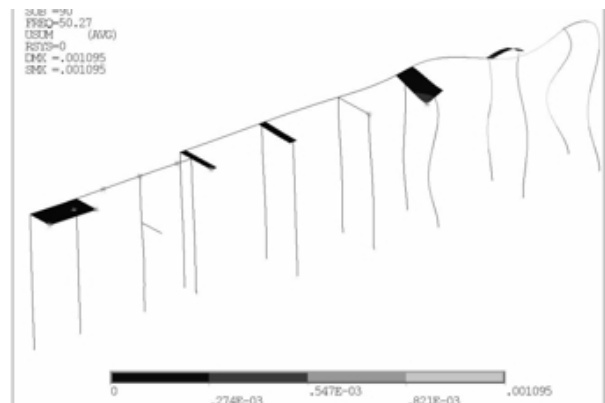


Рис. 13. Власна форма коливань фундаменту на частоті $p=50,27$ Гц

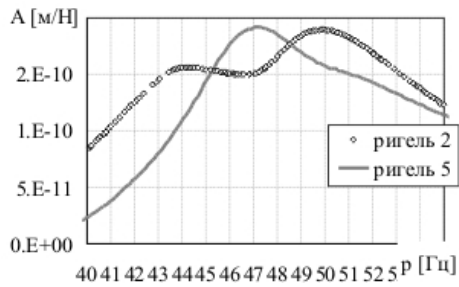


Рис. 14. Амплітудно-частотні характеристики вертикальних переміщень у точках на осі ротора ригелів №2 і №5 фундаменти

Таблиця 2

Власні частоти для системи турбоагрегат — фундамент у діапазоні 98 — 102 Гц

Власні частоти, Гц	
Модель 1	Модель 2
99.303	99.376
99.374	99.395
99.383	99.471
99.421	99.700
99.451	99.974
99.483	100.22
99.697	100.24
100.16	100.67
100.17	100.79
100.25	100.83
100.29	100.85
100.58	100.85
100.67	100.87
100.91	100.88
100.94	100.95

система має щільний спектр власних частот, що підвищується на 0,2 — 0,6 Гц для моделі 2.

Як показав аналіз власних форм, наявність щільного спектра частот у діапазоні 98 — 101 Гц у системи турбоагрегат — фундамент пов'язана з локальними резонансами окремих пластин усіх чотирьох корпусів ЦНТ. При цьому збуджуються коливання тих самих пластин на різних корпусах. Можна говорити про наявність деякого «розладу» однієї власної частоти, форма якої відповідає коливанням торцевих стінок одного ЦНТ. Це пов'язане з тим, що конструкція ЦНТ однакова, а жорсткість фундаменту відрізняється, через його несиметрію.

Проведений порівняльний аналіз частот і форм коливань для вихідної конструкції ЦНТ і модифікованої конструкції ЦНТ (рис. 15, рис. 16) показав, що жорсткість підвищила на 0,5 — 0,6 Гц частоти, форми яких характеризувалися інтенсивними коливаннями передньої стінки кришки корпуса ЦНТ (рис. 15). При цьому максимума амплітуд (уже значно меншої інтенсивності) змістилися на стінки нижньої частини корпуса ЦНТ, торцевих напрямних кришки корпуса та самого корпуса

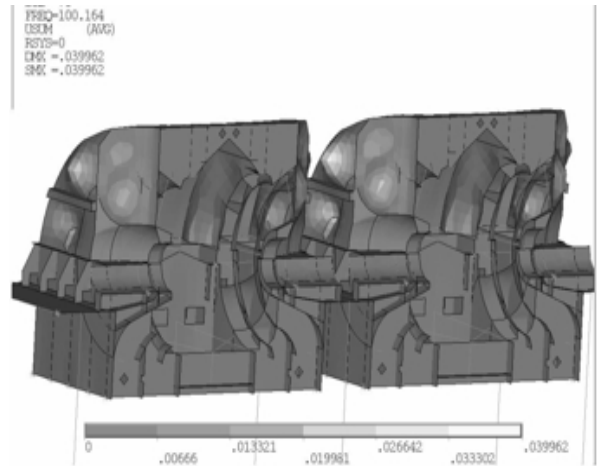


Рис. 15. Власна форма коливань на частоті 100,164 Гц для вихідної моделі

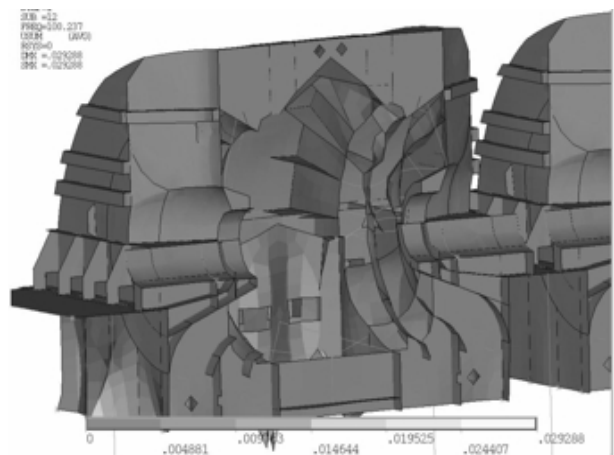


Рис. 16. Власна форма коливань на частоті 100,237 Гц для модифікованої моделі

ЦНТ (рис. 16). Таким чином, підвищення жорсткості стінок кришки корпуса ЦНТ повністю усунуло резонанс з подвійної оборотної частоти 100 Гц.

Висновки. Дослідження вібраційних характеристик багатокорпусного турбоагрегату показало:

- спостерігається розлад власних частот ЦНТ у системі ТФО і внаслідок цього генерація близьких частот з однаковими формами коливань різних корпусів ЦНТ;

- такий розлад вимагає зміщення резонансів ЦНТ від робочої частоти на більшу величину, ніж для однокорпусних турбоагрегатів;

- аналіз АЧХ системи ТФО показав, що для такої конструкції спостерігається глобальний резонанс фундаменту біля робочої частоти і це не дає можливості зміною жорсткості корпуса ЦНТ повністю усунути вібрації стінок ЦНТ, а тільки знизити їх;

- у результаті розрахунку власних частот і форм точно визначені місця корпусів турбіни, де спостерігаються найбільші амплітуди коливань, що дало можливість дати рекомендації для підвищення жорсткості турбіни і налаштування її від резонансу;

— результати проведених досліджень повністю підтверджуються натурними експериментальними даними;
— результати розрахунку показали необхідність розрахунку динамічних характеристик на основі розробленої авторами моделі ТФО на стадії проектування як фундаменту, так і турбоагрегату.

Література

1. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат — фундамент. — К.: Наук. думка, 1991. — 232 с.
2. Степченко А.С. Определение собственных частот и форм фундамента методом синтеза форм // Харьк. политехн. ин-т. — Харьков 1993. — 16 с. — ил. — Библиогр. 7 назв. — Рус. — Деп. в Укринтэи 01.03.93, №307— ук93.
3. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование динамического взаимодействия турбоагрегата К-325-23.5 с фундаментом // Вестник ХГПУ. — Вып. 53 Динамика и прочность машин. — Харьков: ХГПУ, 1999. — С. 64—69.
4. Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С. Исследование влияния конструктивных параметров на динами-

ческие характеристики системы турбоагрегат-фундамент // Вестник ХГПУ. — Вып. 100. — Харьков: ХГПУ, 2000. С. 66—69.

5. Степченко А.С. Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент: Дисс... канд. техн. наук. — Харьков, 1994. — 194 с.

6. Красников С.В. Колебания и надёжность системы турбоагрегат — фундамент — основание с учетом случайности параметров: Дисс... канд. техн. наук. — Харьков, 2003. — 140 с.

Отримана 29.08.08

S. Krasnikov, O. Stepchenko, O. Torjanik
Computer modeling of a multicase turbine unit and the analysis of its vibrating characteristics
*National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute»,
Kharkiv*

In the article it is offered the finite element model of turbine - base system for the steam turbine variant with a multicase turbine unit for calculation of vibrating characteristics. Feature of system is presence of four identical blocks of the low pressure cylinder supporting on the asymmetrical base. The lead analysis of vibrating characteristics has shown presence mistuning eigen frequencies in the system, corresponding to eigen frequencies of the separate low pressure cylinder.

2í ôî ðî àö³ÿ

Nonlinear Normal Modes, Dimension Reduction and Localization in Vibrating Systems

27 September 2009 - 2 October 2009
Frascati (Rome), Italy

Information:

The Colloquium aims at presenting the latest developments in the areas of Nonlinear Normal Modes, Dimension Reduction and Localization, and their applications in vibrating systems. Nonlinear Normal Modes (NNMs) is a classical topic which is presently given a more modern interpretation mostly as regards their formulation for continuous or discontinuous systems, strongly nonlinear regimes, and discretized structures, as well as their use in various applications. They are also of major interest in the framework of Dimension Reduction of dynamical systems, an area where various methods are being formulated and compared with each other, along with the reduced order models – developed for different purposes/systems – based on just nonlinear (vs linear) normal modes or proper orthogonal modes or multi-modes ensuing from nonlinear finite element analyses. In turn, Localization is one major topic (to be possibly addressed via NNMs) in wave propagation and targeted energy transfer. In this context, there is special interest towards analyzing possible occurrence in mechanics of such dynamic phenomena as the discrete breathers highlighted in applied mathematics and physics, where they are paradigmatic solutions in periodic lattices. Cross-fertilization among such companion areas could allow to exploit results useful to describe analogous phenomena likely to occur in engineered materials and devices, with nontrivial effects in terms of efficient/robust energy focusing/transfer, and material/system design.

Contact:

Prof. Giuseppe Rega
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Universita' di Roma La Sapienza
Via A. Gramsci 53
00197 Roma, Italy
Ph: +39-06-49919195
Fax: +39-06-49919192 or +39-06-3221449
e-mail: Giuseppe.Reg@uniroma1.it