

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 519:539:534

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.58

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ, НАБЛИЖЕНИХ ДО РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Красніков С. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Здійснено моделювання системи турбоагрегат-фундамент-основа. Побудовані розрахункові моделі системи дозволяють розглядати її найбільш гнучкі частини як просторові конструкції. Здійснено розрахунки власних коливань. Моделювання системи та розрахування власних форм здійснено за допомогою методу скінченних елементів. За результатами проведеного аналізу було зроблено висновки щодо підвищення працездатності системи та наведено рекомендації щодо подальших досліджень.

Ключові слова: турбіна, вібрація, власні форми, моделювання, метод скінченних елементів, фундамент.

Вступ

Енергетика країн Європи та України значною мірою забезпечується тепловими та атомними електростанціями. Енергоблоки цих електростанцій мають парові турбіни середньої та великої потужностей. Розробником та виробником майже усієї основної лінійки цих турбін у нашій країні є АТ «Українські енергетичні машини». Одним з типів продукції зазначеного товариства є парова турбіна К-500-65/3000 (рис.1). Вона склада-

ється з чотирьох циліндрів низького тиску та одного циліндра високого тиску. До кожного з циліндрів низького тиску приєднано конденсатори. Сама парова турбіна та генератор (турбоагрегат) розташовані на єдиному залізобетонному фундаменті. До системи турбоагрегат-фундамент-основа (ТюО) висуваються багато умов, однією з найважливіших є відсутність резонансів в робочому діапазоні частот.



Рис. 1. Турбоагрегат з паровою турбіною К-500-65/3000

Аналіз публікацій

Загальний аналіз парової турбіни К-500-65/3000 та інших наведених у [1]. Дослідження власних коливань парових турбін спочатку здійснювались на спрощених моделях ротор-фундамент. У цих моделях корпус турбоагрегата та фундамент визначались через узагальнені характеристики жорсткостей опор єдиного для турбоагрегата валопроводу або окремої системи для роторів. Дослідженнями в цій галузі здійснювали групи вчених під керівництвом С. І. Богомоллова, Ю. С. Воробйова, В. М. Журавлевої, Н. Г. Шульженко Найбільше наближеними до реальних умов експлуатації системи ТФО були моделі, розроблені Н. Г. Шульженко, Ю. С. Воробйовим, В. П. Білетченко. У цих моделях використовувалась просторова модель фундаменту та набір з аналітичних й експериментальних характеристик корпусів турбоагрегата. З метою подальшого розвитку цього напрямку досліджень використовували просторові моделі корпусів турбоагрегата в єдиній системі ТФО. Початкові дослідження з цього напрямку були здійсненні В. М. Журавлевою та О. С. Степченко. Процес розвитку моделей ТФО тривав і в інших країнах світу. [1–8]. Моделі ТФО з просторовими системами корпусів циліндрів та фундаментом дозволяють досліджувати власні коливання усієї системи ТФО.

Мета та постановка завдання

Метою дослідження є аналіз власних коливань системи ТФО, наближених до робочої частоти. Об'єктом дослідження є система ТФО з паровою турбіною К-500-65/3000. Предметом дослідження є власні частоти та форми коливань системи.

Математична модель

За методологією методу скінченних елементів, [1] загальне рівняння можна записати як

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = R, \quad (1)$$

де M – матриця інерційно-масових характеристик; C – матриця характеристик з демпфування; K – матриця характеристик жорсткості; R – зовнішнє навантаження.

Для обчислення власних частот (p_j) використовуємо рівняння

$$\det[K - p_j^2 M] = 0. \quad (2)$$

Для пошуку власних форм коливань використовуємо узагальнене рівняння

$$[K - p_j^2 M]\{V_j\} = 0. \quad (3)$$

Власні частоти (p_j) можна знайти за допомогою методу ітерацій у підпросторі.

Розрахункова модель

Було розроблено розрахункову модель системи ТФО за просторовою схемою. Розрахункова модель складається з тривимірних моделей фундаменту та комбінованих моделей циліндрів низького тиску. Фундамент має жорстке кріплення в місцях спирання на основу (грунт та фундамент будівлі електростанції). Циліндри низького тиску приєднано до фундаменту системою жорсткостей з урахуванням точок фіксації. Генератор і циліндр високого тиску є достатньо жорсткими конструкціями, тому були враховані системою мас. Обойми циліндрів низького тиску також є жорсткими оболонками, тому також враховувались системою мас. Верхні частини корпусів циліндрів низького тиску та єдиний валопровід враховувались за спрощеною схемою через систему мас. Конденсатори враховувались за допомогою системи мас та граничних умов, оскільки більшу частину їхньої маси компенсовано системою пружних кріплень. Оскільки система ТФО має площину симетрії, то моделювалась лише її половина. Розрахункову модель наведено на рис. 2. Скінченно-елементна модель має 22870 вузлів та 18238 скінченних елементів

Дослідження власних коливань

Були розраховані власні частоти та форми власних коливань у діапазоні 42–56 Гц. Результати наведені на рис. 3–8 та в табл. 1.

Таблиця 1 – Загальний опис форм коливань

рис.	Частота, Гц	тип форми коливань
3	43,4	глобальна
4	47,7	локальна 1
5	49,4	глобальна
6	52,1	локальна 1
7	53,9	локальна 1
8	54,2	локальна 2

Глобальні форми коливань (на частотах 43,4 Гц, 49, 4 Гц) визначаються сумісними значними коливаннями корпусів турбіни та фундаменту.

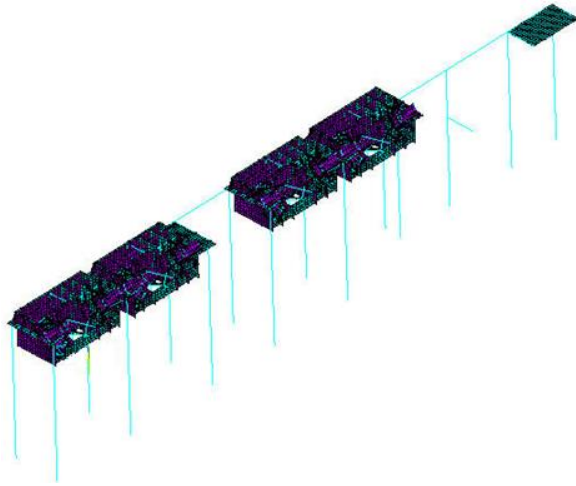


Рис. 2. Турбоагрегат з паровою турбіною
К-500-65/3000

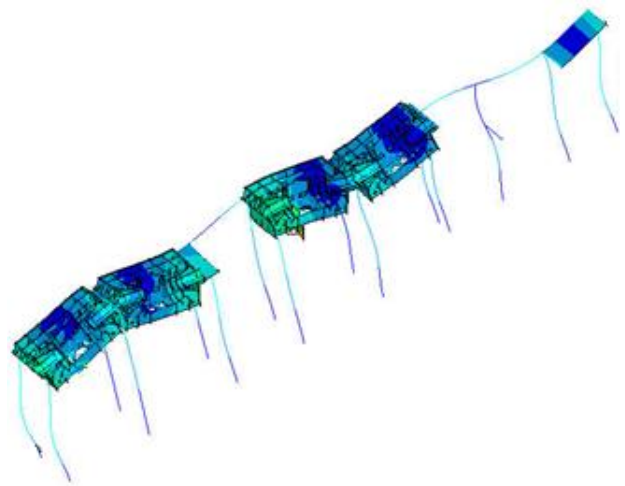


Рис. 3. Власна форма коливань на частоті
43,4 Гц

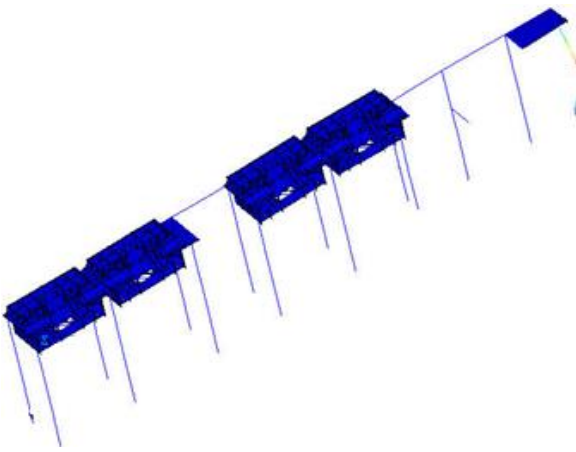


Рис. 4. Власна форма коливань на частоті
47,7 Гц

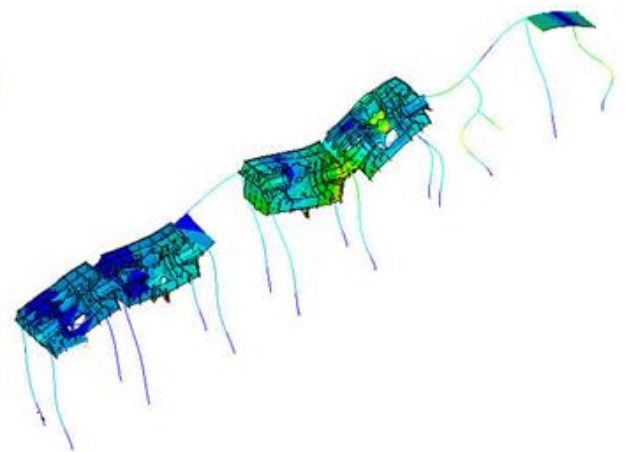


Рис. 5. Власна форма коливань на частоті
49,4 Гц

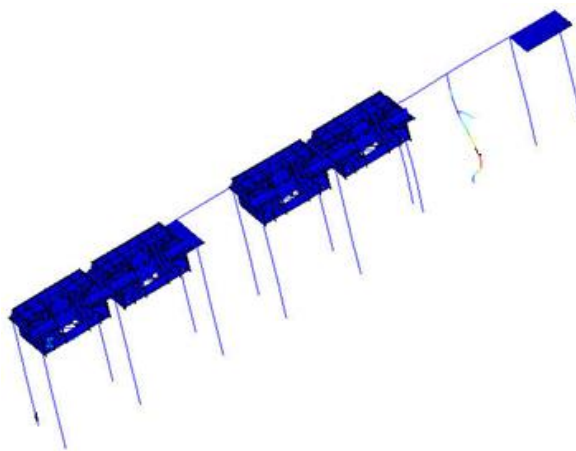


Рис. 6. Власна форма коливань на частоті
52,1 Гц

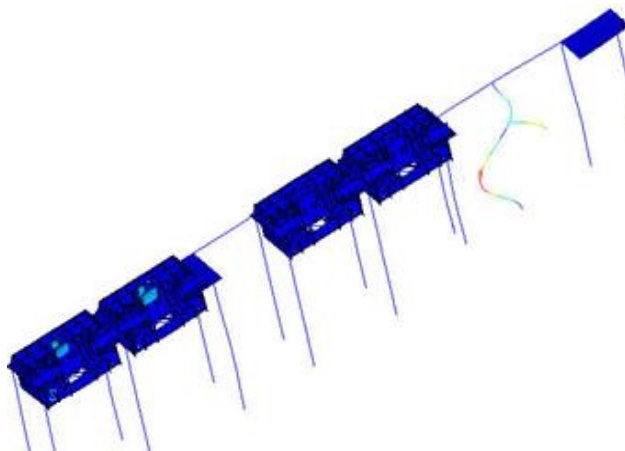


Рис. 7. Власна форма коливань на частоті
53,9 Гц

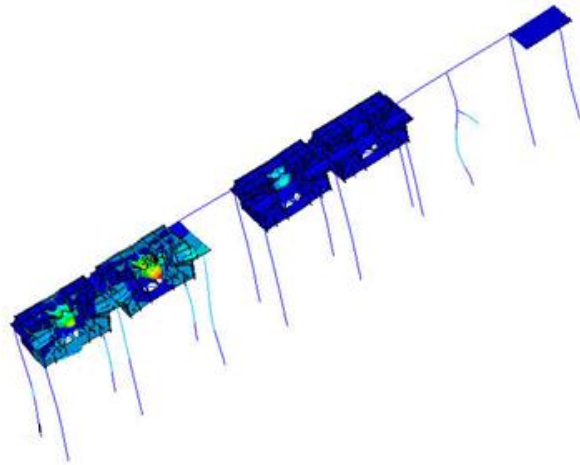


Рис. 8. Власна форма коливань на частоті 54,2 Гц

Форма коливань на частоті 49,4 Гц є найбільш наближеною до робочої частоти 50 Гц. Якщо на частоті 43,4 Гц форма коливань має майже однаковий розподіл рівнів коливань за довжиною фундаменту, то для частоти 49,4 Гц форма коливань суттєво відрізняється. Більші рівні коливань має частина фундаменту, на яку спирається генератор. Також два корпуси циліндрів низького тиску, що наближені до генератора, мають більші рівні коливань, ніж інші два корпуси таких самих циліндрів низького тиску, що знаходяться на великій відстані від генератора.

Тип форми коливань «локальна 1» визначається коливаннями окремих частин фундаменту. Всі три форми власних коливань (на частотах 47,7 Гц, 52,1 Гц, 53,9 Гц) визначаються коливаннями окремої колони біля генератора. Форми власних коливань на частотах 52,1 Гц та 53,9 Гц визначаються коливаннями однієї колони посеред кріплення генератора.

Тип форми коливань «локальна 2» (на частоті 54,2 Гц) визначається коливаннями корпусів циліндрів низького тиску. Водночас варто зазначити, що пара колон посеред кріплення генератора також має помітний рівень коливань.

Висновки

Було побудовано розрахункову модель системи ТФО. Отримано власні частоти та форми власних коливань системи ТФО для діапазону 42–56 Гц.

Дослідження власних частот демонструє наявність частоти 49,4 Гц, що знаходиться біля робочої.

Дослідження форм власних коливань демонструє недостатню жорсткість щонайме-

нше однієї пари колон фундаменту, що знаходиться посеред кріплення генератора. Для підвищення вібраційної працездатності системи потрібно змінити інерційно-масові характеристики фундаменту, зокрема можна запропонувати значно посилити жорсткість пари колон фундаменту, що знаходиться посеред кріплення генератора. Для подальшого аналізу пропонується здійснити дослідження за модернізованим фундаментом або здійснити уточнення результатів аналізу вимушених коливань.

Література

1. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan. 2009. 104 p.
2. A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and Foundation Interaction. Düsseldorf: *ASME Turbo Expo 2014* / Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao. *Turbine Technical Conference and Exposition*. 2014. No. V01BT27A041. P. 1–8.
3. Chowdhury Indrajit, Dasgupta P. Shambhu Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Leiden: CRC Press. 2009. 616 p.
4. Xu X.P., Han Q.K., Chu F.L. Nonlinear vibration of a generator rotor with unbalanced magnetic pull considering both dynamic and static eccentricities. *Archive of Applied Mechanics*. 2016. Vol. 86. P. 1521–1536.
5. Dynamic analysis of a high speed rotor-bearing system / Jalali M. H., Ghayour M., Ziaei Rad S., Shahriari B. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*. 2014. Vol. 53. P. 1–9.
6. Zhang Yang, Yanlong Jiang, Guoyuan Zhang. Bending fault evaluation for the HP-IP rotor system of the nuclear steam turbine based on the dynamic model. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. P. 3364–3379.
7. Minli Yu., Ningsheng Feng, Eric J. Hahn Corrigendum to «An equation decoupling approach to identify the equivalent foundation in rotating machinery using modal parameters» *J. Sound Vib.* 2016. Vol. 365. P.182–198.
8. Minli Yu, Jike Liu, Ningsheng Feng, Eric J. Hahn Experimental evaluation of a quasi-modal parameter based rotor foundation identification technique. *J. Sound Vib.* 2017. Vol. 411. P. 165–192.

References

1. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan. 2009. 104 p.
2. A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and Foundation Interaction. Düsseldorf: *ASME Turbo Expo 2014* / Zhiqiang Hu,

- Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao. *Turbine Technical Conference and Exposition*. 2014. No. V01BT27A041. P. 1–8.
3. Chowdhury Indrajit, Dasguptu P. Shambhu Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Leiden: CRC Press. 2009. 616 p.
 4. Xu X.P., Han Q.K., Chu F.L. Nonlinear vibration of a generator rotor with unbalanced magnetic pull considering both dynamic and static eccentricities. *Archive of Applied Mechanics*. 2016. Vol. 86. P. 1521–1536.
 5. Dynamic analysis of a high speed rotor-bearing system / Jalali M. H., Ghayour M., Ziaei Rad S., Shahriari B. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*. 2014. Vol. 53. P. 1–9.
 6. Zhang Yang, Yanlong Jiang, Guoyuan Zhang. Bending fault evaluation for the HP-IP rotor system of the nuclear steam turbine based on the dynamic model. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. P. 3364–3379.
 7. Minli Yu., Ningsheng Feng, Eric J. Hahn Corrigendum to «An equation decoupling approach to identify the equivalent foundation in rotating machinery using modal parameters» *J. Sound Vib*. 2016. Vol. 365. P.182–198.
 8. Minli Yu, Jike Liu, Ningsheng Feng, Eric J. Hahn Experimental evaluation of a quasi-modal parameter based rotor foundation identification technique. *J. Sound Vib*. 2017. Vol. 411. P. 165–192.

Красніков Сергій Васильович, к.т.н., доц. кафедри деталей машин та теорії механізмів і машин, тел. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevakr@ukr.net, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Study of natural oscillations of a high-power steam turbine near the operating frequency

Abstract. Problem. *The natural frequencies and features of the natural forms of the turboset-foundation-base system near the operating frequency are considered.* **Goal.** *The aim of the work is to study the natural frequencies and modes of natural oscillations of the turboset-*

foundation-base system near the operating frequency range to assess the vibrational state of the system and determine the causes of increased vibrations. The object of the study is the system of turboset-foundation-base. The system consists of a single reinforced concrete foundation on which a steam turbine and a generator are installed. The subject of the study is the natural frequencies and forms of natural oscillations of the turboset-foundation-base system. **Methodology.** *The study was carried out by oscillation methods and the finite element method. The use of original methods developed directly by the author for constructing models of complex machine-building systems should also be mentioned.* **Results.** *As a result of the research, three-dimensional finite element models of low-pressure cylinder bodies, the foundation and the entire turboset-foundation-base system were built. The conducted study allows us to draw a conclusion regarding the causes of an increased level of vibration near the operating frequency and directions for their prevention.* **Originality.** *Regarding the methods of constructing a model of the turboset-foundation-base system, their uniqueness should be noted. The features of the applied modeling method make it possible to take into account the variable interaction between low-pressure cylinder bodies and the foundation. Fixpoints are also taken into account. Previous studies of the turboset-foundation-base system did not allow us to determine the nature of the oscillation modes near the operating frequency.* **Practical value.** *The results of the work relate to direct practical application. As a result of the work, conclusions were made about ways to increase the vibration reliability of the turbine unit-foundation-base system and further research directions.*

Key words: *turbine, vibration, own forms, modeling, finite element method, foundation.*

Krasnikov S.V., Ph.D., Assoc. Prof., Department of Machine Components and Theory of Machines and Mechanisms tel. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevakr@ukr.net

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.