

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 519:539:534

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.27

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОЩНОСТЬЮ 500 МВт

Красников С. В.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Проведено моделирование энергоблока с паротурбинной установкой мощностью 500 МВт. Построены геометрические и расчетные модели. Проведены расчеты вынужденных колебаний всей системы. По результатам расчетов определены причины повышенных вибраций. Расчеты и моделирование выполнено методом конечных элементов.

Ключевые слова: вибрация, паровая турбина, цилиндр низкого давления, метод конечных элементов, колебания, фундамент.

Введение

Экономика ведущих стран мира базируется на развитии высокого уровня технологий производства и совершенствовании энергетического комплекса. Значительная часть электрической энергии в мире и нашей стране вырабатывается на атомных электростанциях. Отечественные энергоблоки включают в себя паротурбинные установки мощностью от 500 до 1000 МВт. В нашей стране турбины этой мощности были разработаны более 30 лет назад учеными и научными коллективами г. Харькова под общим руководством генерального конструктора паровых и газовых турбин ПОАТ «Харьковский турбинный завод» им. Кирова Ю. Ф. Косяка и заместителя генерального конструктора Л. А. Зарубина. Дальнейшие разработки турбин для атомных электростанций проводятся под руководством известных ученых и инженеров АО «Турбоатом»: Е. В. Левченко (генеральный конструктор), В. Л. Швецова (главный конструктор паровых турбин), Н. Н. Гришина, И. И. Кожевурта. Значительную роль в решении производственных и эксплуатационных вопросов паровых турбин на протяжении около 40 лет успешно выполнял А. Ф. Кабанов. К сожалению, не все инженеры и ученые турбиностроения дожили до заслуженной пенсии или получили признание. Многие имена ушедших, живущих с нами и продолжающих трудиться ученых и инженеров отечественного турбиностроения остаются неизвестными. Но благодаря ученым и инженерам, которые вложили свой труд в создание и развитие энергетики, существует наша современная цивилизация, а электричество является привычным и доступным видом энергии в нашей

стране и за рубежом. Среди малоизвестных героев-энергетиков, безусловно, стоит упомянуть Г. И. Попова и В. И. Савенкова, которые в 2009 г. посмертно были награждены орденами «За мужество» III степени. В печальную ночь с 25 на 26 апреля 1986 г. трое инженеров В. И. Савенков, Г. И. Попов и А. Ф. Кабанов проводили виброисследования турбогенераторов № 7 и 8, которые получали энергию для пара из четвертого реактора ЧАЭС. Они вместе с рабочими ЧАЭС первыми приняли участие в ликвидации возникшей катастрофы мирового масштаба. Своевременно оказанная медицинская помощь не смогла отвести смерть В. И. Савенкова и Г. И. Попова, которые в мае и июне 1986 г. ушли из жизни. Вместе с ними была потеряна и уникальная передвижная вибролаборатория. Так, обычная работа виброисследователей оказалась связана с трагическими жертвами и потерями. К сожалению, большинство ликвидаторов этой техногенной катастрофы не получили правительственных наград, а многие были незаслуженно забыты или наказаны. В апреле 1986 г. виброисследования турбогенераторов № 7 и 8 ЧАЭС работниками ПОАТ «Харьковский турбинный завод» им. Кирова проводились в связи с их «неудовлетворительным вибрационным состоянием». Поэтому проведение расчетных исследований колебаний паровых турбин является особенно актуальным и важным для турбогенераторов атомной энергетики.

В результате длительной эксплуатации паротурбинной установки К-500-65/3000 ХТГЗ были выявлены повышенные уровни вибрации корпусов. Проведенные виброисследования подтвердили наличие повышен-

ных уровней вибрации на корпусах паровой турбины, но не позволили выявить причины повышенных вибраций. Была поставлена задача на проведение расчетных исследований колебаний корпусов паровой турбины.

Анализ публикаций

Двадцать две паровых турбины типа К-500-65/3000 ХТГЗ находятся в эксплуата-

ции в нашей стране и за рубежом. Турбина включает в себя пять цилиндров, из которых четыре цилиндра низкого давления (ЦНД) имеют гибкий корпус подверженный вибрацией (рис. 1). Корпуса ЦНД турбины одинаковы и отличаются только местом расположения на фундаменте. Нумерация ЦНД приведена на рис. 1.

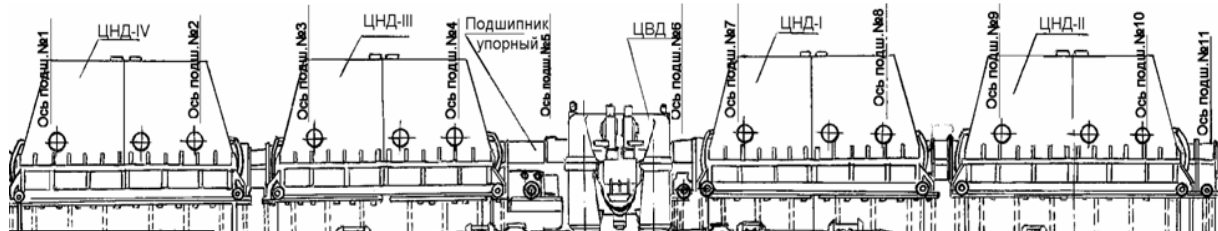


Рис. 1. Общий вид паротурбинной установки К-500-65/3000 ХТГЗ

Каждый корпус состоит из двух выхлопных патрубков и технологически разделяется на верхнюю и нижнюю части. Выхлопные патрубки соединяются вертикально фланцами на плоскости симметрии, которая перпендикулярна оси турбины (ось валопровода). Нижние части выхлопных патрубков с помощью сварочного соединения имеют жесткую связь с переходным патрубком конденсатора. Внутри корпусов ЦНД находится обойма с диафрагмами пяти ступеней. Жесткость верхней половины выхлопных патрубков обеспечивается в большей степени за счет стержней и труб, а нижней части – за счет пластин и стенок (сот).

В источниках [1–4] приводится подробное описание паротурбинной установки К-500-65/3000 ХТГЗ, пути решения основных проблем в процессе ее конструирования и модернизации.

Цель и постановка задачи

Целью работы является определение амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний на стенках верхней части корпусов ЦНД, а также причин повышенных уровней их вибрации. Объектом исследования является система турбина-фундамент-основание с паровой турбиной К-500-65/3000 ХТГЗ. Предметом исследования являются амплитуды вынужденных колебаний верхней части корпуса ЦНД и причины их повышенного уровня.

Математическая модель

Основной функционал задачи записывается через разность кинетической и потенциальной энергии в следующем виде:

$$L(t, O, q) = 0, \quad (1)$$

где O – связи турбины с фундаментом; L – уравнение Лагранжа 2-го рода; q – обобщенные перемещения.

В соответствии с методом конечных элементов [5–7] функционал (1) представлен в матричном виде:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = R, \quad (2)$$

где M – матрица масс; C – матрица демпфирования; K – матрица жесткости; R – внешние воздействия.

Система уравнений для определения собственных частот и форм (мод) системы определяется по формуле (3):

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

Вектора амплитуд вынужденных колебаний определяются с помощью метода итераций в подпространстве [5, 6].

Описание расчетной модели

В качестве развития методов исследования колебаний паротурбинных установок, предложенных С. И. Богомолым, А. М. Журавлевой, В. А. Жовдаком, А. С. Степченко, автором была ранее раз-

работана методика моделирования системы турбина-фундамент-основание [8–10]. В соответствии с этой методикой построение модели железобетонного фундамента проводится стержневыми конечными элементами; цилиндр высокого давления, генератор и валопровод – массовыми элементами; корпуса ЦНД – системой пластин, стержней, масс. Переходной патрубков, конденсаторы и связи между элементами системы турбина-фундамент-основание моделировались с помощью дополнительных масс и граничных условий [11–14]. За счет особенностей такого способа моделирования система связей турбины с фундаментом аппроксимирует три состояния – жесткая связь, свободное опирание и упругое взаимодействие [15–20]. Для расчетов колебаний была использована конечно-элементная модель из 27 040 узлов и 23 165 конечных элементов [21].

Внешний вид половины модели корпуса ЦНД приведен на рис. 2.

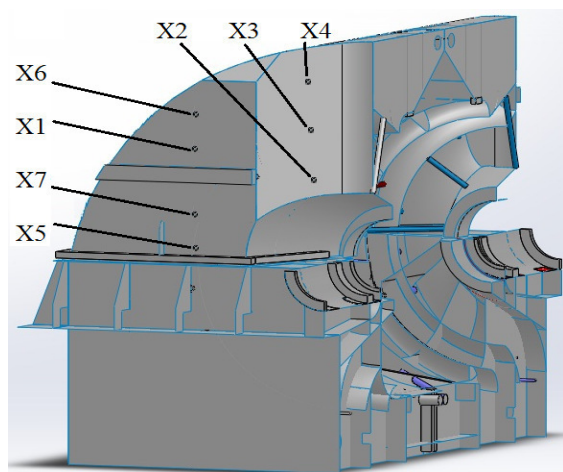


Рис. 2. Конечно-элементная модель паротурбинной установки К-500-65/3000 ХТГЗ

Для расчетов использовались внешние воздействия в виде системы равных сил по 1 Н в местах расположения встроенных корпусов подшипников роторов низкого давления. Расчеты проводились в диапазоне частот вынужденных колебаний 0–55 Гц.

Расчетные исследования амплитудных характеристик колебаний корпусов ЦНД

Были проведены расчеты амплитуд колебаний точек верхних частей корпусов ЦНД. Расположение точек на торцевой стенке корпуса ЦНД приведено на рис. 2.

На рис. 3–9 приведены амплитудно-частотные характеристики колебаний точек корпусов ЦНД. Из рисунков видно, что для всех рассмотренных точек на торцевой стенке наблюдается резонансный пик в районе частоты $p = 48$ Гц.

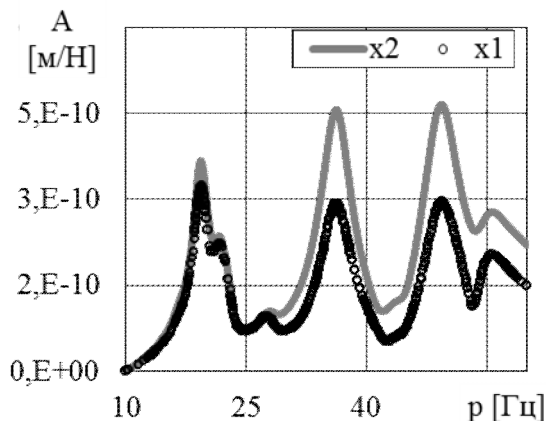


Рис. 3. Амплитуды колебаний в точках x1, x2 ЦНД-2 (сторона генератора)

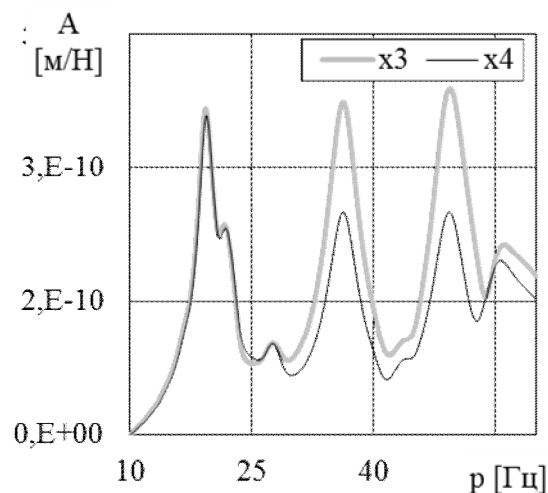


Рис. 4. Амплитуды колебаний в точках x3, x4 ЦНД-2 (сторона генератора)

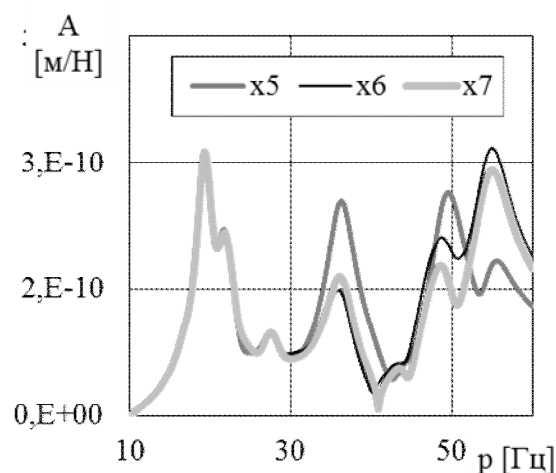


Рис. 5. Амплитуды колебаний в точках x5, x6, x7 ЦНД-2 (сторона генератора)

Из рисунков 3–5 видно, что графики амплитуд колебаний точек X1, X2, X3, X4, X6 имеют качественное сходство. Также графики амплитуд колебаний точек X5, X7 качественно сходны между собой и отличаются от предыдущих. Это отличие связано с имеющимся ребром жесткости на внешней стенке, которое разделяет пластину на две части. Точки X5, X7 располагаются под ребром жесткости, а остальные точки выше. При увеличении частоты колебаний качественные и количественные различия графиков усиливаются.

На рис. 6–9 приведены сравнительные амплитудно-частотные характеристики колебаний точек X1 корпусов ЦНД на двух противоположных стенках: стороне генератора (со стороны подшипника № 11, обозначается «ген-модель 1») и регулятора (со стороны подшипника № 1, обозначается «рег-модель 1»). Номера ЦНД приведены на рисунках в обозначениях графиков.

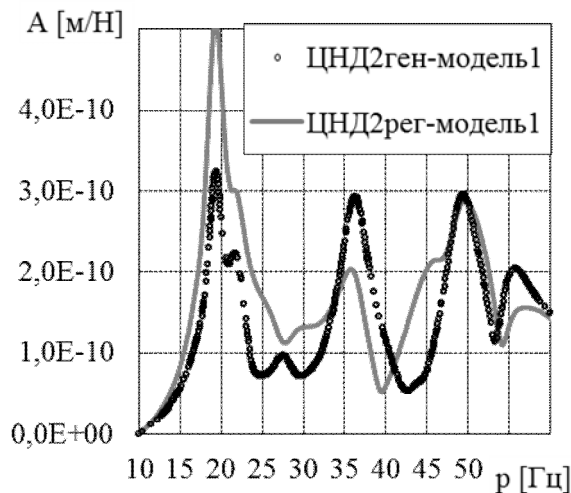


Рис. 6. Амплитуды колебаний точки X1

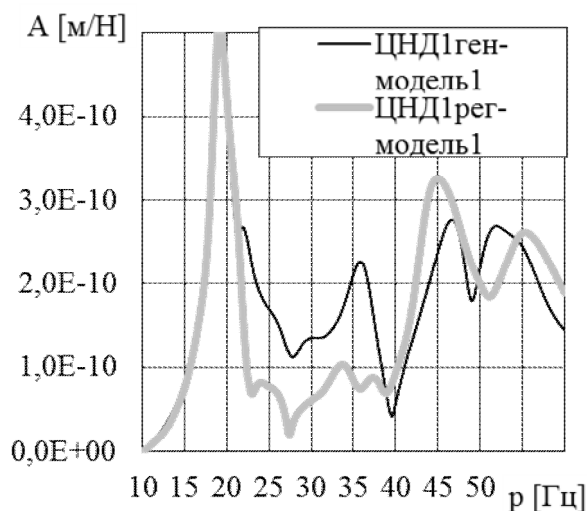


Рис. 7. Амплитуды колебаний точки X1

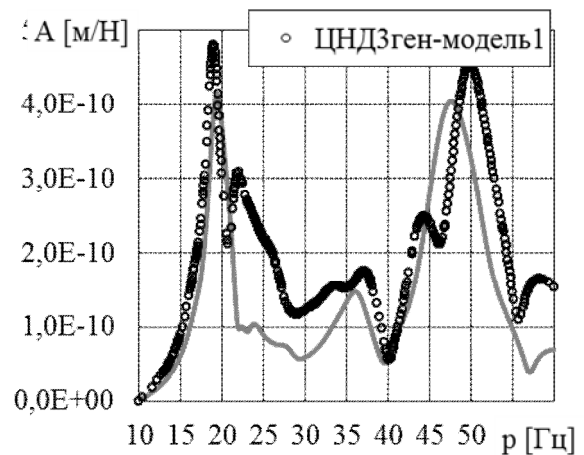


Рис. 8. Амплитуды колебаний точки X1

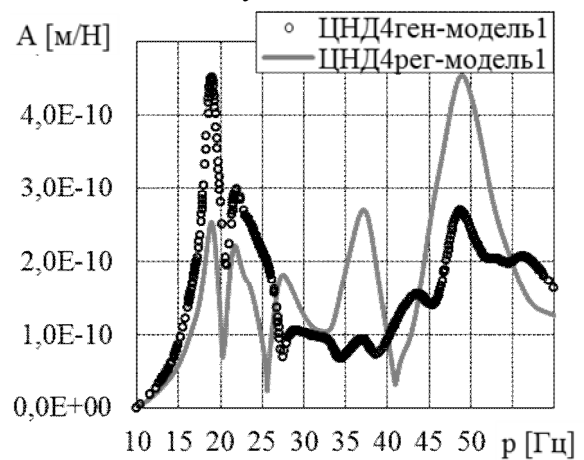


Рис. 9. Амплитуды колебаний точки X1

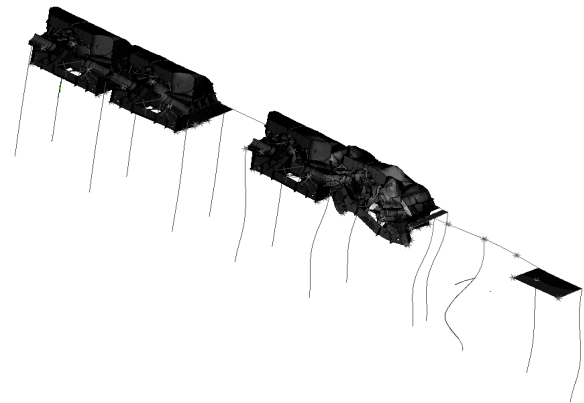


Рис. 10. Собственная форма колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание на частоте 51,2 Гц

Из рисунков 6–10 видно, что графики амплитуд колебаний точки X1 на ближайшем к генератору корпусе (ЦНД2) имеют наименьшие качественные и количественные отличия на двух противоположных сторонах. Также видно, что при удалении от генератора отличия графиков увеличиваются. Наибольшие

качественные и количественные отличия рассматриваемые графики имеют для наиболее удаленного от генератора корпуса (ЦНД4). Эта зависимость показывает, что на колебания верхних частей корпусов ЦНД оказывает значительное влияние вибрация генератора. Это подтверждается ранее проведенными исследованиями [13].

На рис. 10 приведена собственная форма колебаний системы турбоагрегат-фундаментоснование на частоте 51,2 Гц. Из рис. 10 видно, что колебания генератора и паровой турбины в значительной степени связаны с колебаниями фундамента.

Выводы

Исследования колебаний верхних частей корпусов ЦНД паровой турбины показали наличие значительных амплитуд колебаний в нескольких частотных диапазонах. Причинами повышенных вибраций являются недостаточная жесткость исследуемой конструкции, влияние колебаний фундамента и генератора. Для устранения причин вибрации необходим комплексный подход, в частности ужесточение фундамента.

Литература

1. Косяк Ю. Ф. и др. Паротурбинные установки атомных электростанций / ред. Ю. Ф. Косяк. Москва: Энергия, 1978. 312 с.
2. Трояновский Б. М. Турбины для атомных электростанций. Москва: Энергия, 1978. 182 с.
3. Левченко Е. В., Швецов В. Л., Кожешкурт И. И., Лобко А. Н. Опыт ОАО «ТурбоАтом» в разработке и модернизации турбин для АЭС. *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. Санкт-Петербург, 2010. № 3. С. 5–11.
4. Субботин В. Г., Левченко Е. В., Швецов В. Л. Паровые турбины ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. Харьков, 2009. № 3. С. 6–17.
5. Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. Харьков: Основа, 1991. 271 с.
6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Москва: Мир, 1984. 428 с.
7. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. То-кью: Japan. 2009. 104 p.
8. Назаренко С. А., Качук Н. А. Обзор некоторых ключевых направлений исследований ученых НТУ «ХПИ» в области динамики конструкций. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харків, 2017. № 39. С.49–56.
9. Ларін А., Чумаченко О. Співпраця запорізьких авіадвигунобудівних підприємств з провідними вченими України в галузі динамічної міцності в 1950–1970-х рр. *Дослідження з історії техніки*. Харків, 2016. № 23. С.72–78.
10. Жовдак В. О., Красников С. В., Степченко О. С. Решение задачи статистической динамики машиностроительных конструкций с учетом случайного изменения параметров. *Проблемы машиностроения*. Харьков, 2004. Т. 7. № 3. С. 39–47.
11. Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao. A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and Foundation Interaction. Düsseldorf: *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2014. no. V01BT27A041. P. 1–8.
12. Alan Turnbull. Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. London: The Royal Society, 2014. no. 20140254. P. 1–19.
13. Chowdhury Indrajit, Dasgupta P. Shambhu Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Leiden: CRC Press, 2009. 616 p.
14. Рунов Б. Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов. Москва: Энергоиздат, 1982. 352 с.
15. Yu M., Feng N., Hahn E. J. An equation decoupling approach to identify the equivalent foundation in rotating machinery using modal parameters. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 365. P. 182–198.
16. 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.
17. Jalali M. H., Ghayour M., Ziaei Rad S., Shahriari B. Dynamic analysis of a high speed rotor-bearing system. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*. 2014. Vol. 53. P. 1–9.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Красников С. В. Моделирование и анализ вибрационных характеристик корпуса паровой турбины большой мощности. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харків, 2017. № 39. С.23–26.

References

1. Kosyak Yu. F. and other (1978). Paroturbinnye ustanovki atomnykh elektrostantsii, red. Yu. F. Kosyak [Steam turbine installations of atomic power plants], Moscow, Energiya. 312 [in Russian].
2. Troyanovskii B. M. (1978). Turbiny dlya atomnykh elektrostantsii [Turbines for nuclear power plants], Moscow, Energiya. 182 [in Russian].
3. Levchenko E. V., Shvetsov V. L., Kozheshkurt I. I., Lobko A. N. (2010). Opyt OAO «TurboAtom» v raz-rabotke i modernizatsii turbin dlya AES [Experience of OJSC «TurboAtom» in the development and modernization of turbines for nuclear power plants.], *Energeticheskie i teploekhnicheskije protsessy i oborudovanie. SantPeterburg.* 3, 5–11 [in Russian].
4. Subbotin V. G., Levchenko E. V., Shvetsov V. L. (2009). Parovye turbiny OAO «Turboatom» dlya teplovykh elektrostantsii [Turboatom steam turbines for thermal power plants]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KhPI». Khar'kov,* 3, 6–17 [in Russian].
5. Eremenko S. Yu. (1991). Metody konechnykh elementov v mekhanike deformiruemykh tel [Finite-element methods in mechanics of deformable bodies.], Khar'kov: Osnova. 271 [in Russian].
6. Gallager R. (1984) Metod konechnykh elementov. Osnovy [The finite element method. Basedata], Moscow, Mir. 428 [in Russian].
7. (2009). HITACHI. Turbine and Generator Foundation *Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan,* 104.
8. Nazarenko S. A., Tkachuk N. A (2017). Obzor nekotorykh klyuchevykh napravlenii issledovaniy uchenykh NTU «KhPI» v oblasti dinamiki konstruksii. [Review of the main directions of research of scientists of NTU «KhPI» in the field of dynamics of constructions]. *Visnik NTU «KhPI», Kharkiv,* 39, 49–56 [in Russian].
9. Larin Andrii, Chumachenko Ol'ga (2016) Spivpratsya zaporiz'kikh aviadvigunobudivnykh pidpriemstv z providnimi vchenimi Ukraïni v galuzi dinamich-noï mitsnosti v 1950-1970-kh rr. [Cooperation Zaporizhzhya aviation engine-building companies with the leading scientists of Ukraine in the field of dynamic strength in the 1950-1970.] *Dosli-dzhennya z istorii tekhniki, Kharkiv,* 23, 72–78 [in Ukrainian].
10. Zhovdak V. O., Krasnikov S. V., Stepchenko O. S. (2004). Reshenie zadachi statisticheskoi dinamiki ma-shinostroitel'nykh konstruksii s uchetom slu-chainogo izmeneniya parametrov [The solution of the problem of the statistical dynamics of the machine-building constructions taking into account a random change in parameters. Kharkiv: Engineering problems]. *Problemy mashinostroeniya, Kharkiv.* 3, 39–47 [in Russian].
11. Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao (2014). A Seismic Analysis on Steam Turbine Con-sidering Turbine and Foundation Interaction. *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf.* V01BT27A041, 1–8.
12. Alan Turnbull (2014). Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, London: The Royal Society.* 20140254, 1–19.
13. Chowdhury Indrajit, Dasguptu P. Shambhu (2009). Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Leiden: CRC Press, 616.
14. Runov B. T. (1982) Issledovanie i ustranenie vibratsii parovykh turboagregatov [Research and elimination of the vibration of the steam turbine units], Moscow, Energoizdat. 352 [in Russian].
15. Gallager R. (1984) Metod konechnykh elementov. Osnovy [The finite element method. Basedata], Moscow, Mir. 428 [in Russian].
16. Xu X. P., Han Q. K., Chu F. L. (2016) Nonlinear vibration of a generator rotor with unbalanced magnetic pull considering both dynamic and static eccentricities. *Archive of Applied Mechanics.* 86, 1521–1536.
17. Jalali M. H., Ghayour M., Ziaei Rad S., Shahriari B. (2014) Dynamic analysis of a high speed rotor-bearing system. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation.* 53, 1–9.
18. Zhang Yang, Yanlong Jiang, Guoyuan Zhang (2017) Bending fault evaluation for the HP-IP rotor system of the nuclear steam turbine based on the dynamic model. *Journal of Vibroengineering.* 19, 3364–3379.
19. Minli Yu., Ningsheng Feng, Eric J. Hahn (2016) Corrigendum to «An equation decoupling approach to identify the equivalent foundation in rotating machinery using modal parameters» *J. Sound Vib.* 365, 182–198.
20. Minli Yu, Jike Liu, Ningsheng Feng, Eric J. Hahn (2017) Experimental evaluation of a quasi-modal parameter based rotor foundation identification technique. *J. Sound Vib.* 411, 165–192.
21. Krasnikov S. V. (2017). Modelirovanie i analiz vibratsionnykh kharakteristik korpusa parovoi turbiny bol'shoi moshchnosti [Modeling and analysis of the vibration characteristics of a high-power steam turbine hull]. *Visnik NTU «KhPI», Kharkiv,* 39, 23–26 [in Russian].

Красников Сергей Васильевич, к.т.н., доцент кафедры теоретической механики и гидравлики, тел. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevakr@list.ru. Харьковський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, Харків, 61002, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Investigation of oscillations of the case of steam turbine with a capacity of 500 MW

Abstract. Problem. The problem of increased vibration of bodies of a steam turbine with a capacity of 500 MW is considered. The main cause of the increased vibration of the steam turbine is the rotor's

unbalance and insufficient stiffness of the system elements. The case of operating practice is considered, where the rotational alignment did not significantly change the vibration parameters. **Goal.** The purpose of this work was to simulate the forced oscillations of the bodies of low-pressure cylinders in the turbine-foundation-base system with a turbine K-500-65 / 3000 KHTZ, as well as to study the causes of their increased vibration. **Methodology.** The research was carried out using the method of oscillation, the method of finite elements, as well as author's methods of constructing models and conducting research on oscillations of the turbine-foundation-base system. **Results.** As a result of the research, a three-dimensional finite-element model of the turbine-foundation-base system was obtained, and the amplitude-frequency dependences for the points of the cylinder body of low pressure were obtained. The conducted study made it possible to draw conclusions about the causes of increased vibration of the upper parts of the bodies of the steam turbine. **Originality.** The type of developed three-dimensional models of the turbine-foundation-base system is unique. Due to the features of this model, it is possible to study vibration processes at a level that allows you to analyze the vibrations of complex elements of the system. For individual studies, further specification of the individual parts of the system is required. This allows us to use the features of the finite element method to specify the turbine-foundation-base system in accordance with the actual operating conditions. By other researchers, using other methods and approaches, the problem was not solved and the causes of the hanging vibration of the cylinder body of low pressure were clarified. **Practical value.** The practical significance of the work performed is an illustrative tool for the development of specialized models for investigating forced oscillations of the turbine-foundation-base system, as well as solving a practical problem in analyzing the causes of increased vibration of individual complex elements. The results of the work were used to develop measures to improve the vibration state of power units with steam turbines of 500 MW capacity.

Key words: vibration, steam turbine, low pressure case, finite element method, oscillations, foundation.

Krasnikov S. V., Ph.D., Assoc. Prof.,
tel. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevavr@list.ru.
Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Дослідження коливань корпусу парової турбіни потужністю 500 МВт

Анотація. Розглянуто проблему підвищеної вібрації корпусів парової турбіни енергоблоку

потужністю 500 МВт. Основною причиною виникнення підвищеної вібрації парової турбіни є небаланс ротора та недостатня жорсткість елементів системи. Розглядається випадок з практики експлуатації, де центрування роторів не надала суттєвих змін вібраційних параметрів. Метою цієї роботи було моделювання вимушених коливань корпусів циліндрів низького тиску в системі турбіна-фундамент-основа з турбіною K-500-65/3000 ХТГЗ, а також дослідження причин їх підвищеної вібрації. Дослідження проводилися за допомогою метода коливань, метода скінчених елементів, а також розробленими автором методиками побудови моделей та проведення досліджень коливань системи турбіна-фундамент-основа. Унаслідок проведених досліджень було отримано тривимірну скінченно-елементну модель системи турбіна-фундамент-основа, отримані амплітудно-частотні залежності для точок корпусів циліндрів низького тиску. Проведене дослідження дозволило зробити висновки щодо причин підвищеної вібрації верхніх частин корпусів парової турбіни. Тип розроблених тривимірних моделей системи турбіна-фундамент-основа є унікальним. Завдяки особливостям цієї моделі існує можливість дослідження вібраційних процесів на рівні, що дозволяє аналізувати вібрації складних елементів системи. Для окремих досліджень потрібна додаткова конкретизація окремих частин системи. Саме це дозволяє використовувати особливості методу скінчених елементів для конкретизації системи турбіна-фундамент-основа згідно з реальними умовами експлуатації. Сторонніми дослідниками за допомогою інших методів та підходів не було вирішено поставлену проблему та з'ясовано причини підвищеної вібрації корпусів циліндрів низького тиску. Практичне значення проведеної роботи має наочний засіб розробки спеціалізованих моделей для дослідження вимушених коливань системи турбіна-фундамент-основа, а також вирішення практичного завдання з аналізу причин підвищеної вібрації окремих складних елементів. Результати роботи було використано для розробки заходів щодо поліпшення вібраційного стану енергоблоків з паровими турбінами потужністю 500 МВт.

Ключові слова: вібрація, парова турбіна, циліндр низького тиску, метод кінцевих елементів, коливання, фундамент.

Красніков Сергій Васильович, к.т.н., доцент кафедри теоретичної механіки і гідравліки, тел. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevavr@list.ru.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.