

С.В. КРАСНИКОВ**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА ТУРБИНЫ 500 МВт
ВБЛИЗИ ОСНОВНОЙ МОДЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Проведено моделирование системы турбоагрегат-фундамент-основание с паротурбинной установкой мощностью 500 МВт. Для исследования выбрана система с паровой турбиной, которая содержит несколько типовых корпусов. Построены геометрические и расчетные модели. Проведены расчеты вынужденных колебаний наиболее гибких корпусов паровой турбины в диапазоне частот близких к основной моде, которая характеризуется максимальными вертикальными колебаниями. Расчеты и моделирование выполнено методом конечных элементов. Определены места наибольших амплитуд колебаний на внешних стенках корпусов паровой турбины. По результатам расчетов определены причины повышенных вибраций.

Ключевые слова: вибрация, паровая турбина, система турбоагрегат-фундамент-основание, метод конечных элементов, собственные частоты и формы колебаний, фундамент.

С.В. КРАСНИКОВ**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ КОРПУСА ТУРБИНИ 500 МВт
ПОБЛИЗУ ОСНОВНОЇ МОДИ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**

Розглянуто проблему підвищеної вібрації найбільш гнучких корпусів парової турбіни енергоблоку потужністю 500 МВт. Основною причиною виникнення підвищеної вібрації парової турбіни є небаланс ротору та недостатня жорсткість елементів системи. Розглядається випадок з практики експлуатації, де центрування роторів не надала суттєвих змін вібраційних параметрів. Ціллю даної роботи було моделювання вимушених коливань корпусів циліндрів низького тиску в системі турбіна-фундамент-основа з турбіною потужністю 500 МВт, а також дослідження причин їх підвищеної вібрації. Дослідження проводились за допомогою метода коливань, метода скінчених елементів, а також розробленими автором методиками побудови моделей та проведення досліджень коливань системи турбіна-фундамент-основа. В результаті проведених досліджень було отримано трьохвимірну скінчено-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. Завдяки унікальним особливостям розробленої моделі існує можливість дослідження вібраційних процесів на рівні, що дозволяє аналізувати вібрації складних елементів системи. Практичне значення проведеної роботи має наглядний засіб розробки спеціалізованих моделей для дослідження вимушених коливань системи турбіна-фундамент-основа, а також розв'язок практичної задачі з аналізу причин підвищеної вібрації окремих складних елементів.

Ключові слова: вібрація, парова турбіна, система турбоагрегат-фундамент-основа, метод скінчених елементів, власні частоти та форми коливань, фундамент.

S.V. KRASNIKOV**MODELING AND ANALYSIS OF 500 MW TURBINE CASING OSCILLATIONS
NEAR BASIC VERTICAL OSCILLATION**

The problem of increased vibration of the most flexible housings of a steam turbine of a power unit of 500 MW is considered. The main cause of the increased vibration of the steam turbine is the unbalance of the rotor and insufficient rigidity of the elements of the system. A case study is considered where the centering of the rotors did not significantly change the vibration parameters. The purpose of this work was to simulate the forced oscillations of low pressure cylinder housings in a turbine-foundation system with a turbine capacity of 500 MW, and to investigate the causes of their increased vibration. The studies were carried out using the oscillation method, the finite element method, as well as the methods developed by the author to construct models and conduct oscillation studies of the turbine-foundation system. As a result of the studies, a three-dimensional finite element model of the turbine-foundation-base system was obtained. The amplitude-frequency dependences for the points of the low-pressure cylinder housings were obtained. The conducted research made it possible to draw conclusions about the causes of increased vibration of the rotors of the steam turbine. 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 the vibrational processes at the level, which allows you to analyze the vibrations of almost all elements of the system. For individual studies, further specification of the parts of the system important for the task is needed. The study made it possible to conclude on the causes of increased vibration of the upper parts of the steam turbine housings. Due to the unique features of the developed model, it is possible to study vibration processes at a level that allows you to analyze the vibrations of complex elements of the system. The practical value of the work carried out is a clear tool for the development of specialized models for the investigation of the forced oscillations of the turbine-foundation-base system, as well as the solution of a practical problem to analyze the causes of increased vibration of individual complex systems of the elements. The results of the realized work were used to develop measures to improve the vibration state and reliability of power units with steam turbines with a capacity of 500 MW.

Keywords: vibration, steam turbine, turbine-foundation-base system, finite element method, own frequencies and forms of oscillations, foundation.

Введение. Экономика передовых стран в мире базируется на развитии высокотехнологичного производства, которое невозможно без мощного энергетического комплекса и его постоянного совершенствования. Большая часть электрической энергии в мире и нашей стране вырабатывается на атомных и тепловых электростанциях. Отечественные энергоблоки атомных электростанций включают в себя паротурбинные установки мощностью 500, 800 и 1000 МВт. В стране прогрессирующей экономики, одним из преемников которой стала наша страна, турбины указанной мощности были разработаны полвека назад учеными и инженерами г.Харькова под общим руководством генерального конструктора паровых и газовых турбин ПОАТ «Харьковский турбинный завод» имени Кирова Косяка Юрия Федоровича. Значительный вклад в практическое воплощение научных решений сделал заместитель генерального конструктора Зарубин Леонид Александрович. Перечислить всех ученых и инженеров, которые вложили свой труд в создание основополагающих серий турбин атомной энергетики не просто. Многие имена забыты. Труды знаменитых отечественных ученых сейчас востребованы не в нашей стране, а преимущественно за рубежом. Это один из факторов, который показывает на цели и результаты деятельности руководства нашей страны и отраслей народного хозяйства. Основные процессы экономики нашей страны сводятся к противоположным тенденциям от развитых стран мира, в частности Китая. Фактически последнее десятилетие Китай планомерно берет под контроль наукоемкое и трудоемкое производство в нашей стране. При этом он использует своих специалистов и производственные мощности. Одним из факторов их успеха является то, что китайские специалисты на всех уровнях умело используют научные и технические достижения других стран, в частности нашей. Среди технологий, которые активно применяются китайскими производителями, одними из ключевых являются разработки в области энергетики и, в частности, в производстве энергоблоков и паровых турбин. Одним из факторов надежности работы паротурбинных установок является отстройка от резонанса и другие вопросы колебаний корпусных и роторных систем.

Исследованием резонансных процессов роторных систем в нашей стране занималось большое количество ученых. Значительный вклад в разработку методов исследования роторных систем газотурбинной и паротурбинной техники сделали харьковские ученые: Сергей Иванович Богомолов, Алефтина Матвеевна Журавлева, Юрий Сергеевич Воробьев, Николай Григорьевич Шульженко. Основоположник этой школы С.И. Богомолов был дважды удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники, а также был признан еще в 1985 году заслуженным деятелем науки Украинской ССР. С.И. Богомоловым и А.М. Журавлевой в до СНГ-пространстве было начато принципиально новое направление – исследование колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание на основе трехмерного моделирования наиболее гибких корпусных конструкций паротурбинных уста-

новок. Значительный вклад в развитие этого направления сделали Александр Станиславович Степченко и Валерий Алексеевич Жовдак. При исследовании резонансных процессов значительное внимание уделяется колебаниям вблизи первого резонанса, которые оказывают существенное влияние на работоспособность всей системы турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО) [1-4]. Моделирование и анализ колебаний корпусов паровых турбин в системе турбоагрегат-фундамент-основание является сложной, но необходимой задачей для обеспечения надежности работы системы ТФО.

Цель работы. Необходимо провести моделирование и анализ вынужденных колебаний корпусов цилиндров низкого давления в системе ТФО с турбиной 500 МВт соответствующих частотам вблизи основной моды вертикальных колебаний. Объектом проведенных исследований является система ТФО с наиболее гибкими корпусами турбины 500 МВт. Предметом исследования являются характеристики колебаний системы ТФО с наиболее гибкими элементами турбины.

Математическая модель. Для моделирования и вычисления характеристик собственных колебаний используется метод конечных элементов. Основной функционал в общем виде:

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

где O – различные состояния связи корпусов турбины с фундаментом;

L – уравнение Лагранжа 2-го рода;

q – обобщенные перемещения;

R – внешние силы.

В методе конечных элементов [5-7] выражение (1) часто записывается в следующем матричном виде:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = 0, \quad (2)$$

где M – матрица масс,

C – матрица демпфирования,

K – матрица жесткости.

Собственная частота системы p_j определяется из формулы (3):

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

Описание расчетной модели. На основе разработанных геометрических моделей фундамента и корпуса цилиндра низкого давления был построено ряд конечно-элементных моделей [8-13]. Для проведения расчетов выбрана модель из 27040 узлов и 23165 конечных элементов. Внешний вид моделей корпусов цилиндра низкого давления паровой турбины показан на рис. 1. Корпусов ЦНД в исследуемой турбине четыре и они имеют соответствующие номера от одного до четырех [1-2]. Из рис. 1 видно, что наиболее гибкие части турбины моделировались трехмерной системой пластин, стержней и масс. Жесткие части турбины и генератор моделировались системой масс и связей. Фундамент моделировался как система стержневых элементов. Связь гибких частей турбины с фундаментом моделировалось системой жесткостей, которая учитывает особенности взаимодействия турбины с

фундаментом [14 - 21].

Результаты численных исследований. Были проведены расчеты вынужденных колебаний системы ТФО вблизи основной моды. Первые собственные частоты всей системы ТФО, которые характеризуются максимальными значениями амплитуд вертикальных колебаний находятся в диапазоне 18,7-19,9 Гц. Этих частот четыре, формы вынужденных колебаний корпусов турбины в системе ТФО вблизи этих частот аналогичны и показаны на рис. 2. Отличие заключается в разном соотношении амплитуд колебаний одинаковых точек системы. На одной частоте максимальную амплитуду колебаний имеет один корпус ЦНД, а

на остальных – другие.

На рис. 3 показаны точки определения амплитуд колебаний на внешней стенке корпуса второго цилиндра низкого давления. На рис. 4 – 10 показаны распределения амплитуд вертикальных колебаний указанных на рис. 3 точек вблизи соответствующей основной моды системы ТФО.

Из рис. 4-10 видно, что указанные точки имеют значительные амплитуды колебаний вблизи основной моды. Их значения имеют коэффициенты динамичности 4 и более. При этом амплитуды колебаний внутренней стенки (точки x2, x3, x4) корпуса ЦНД имеют большие значения, чем на второй стенке (точки x1, x5, x6, x7).

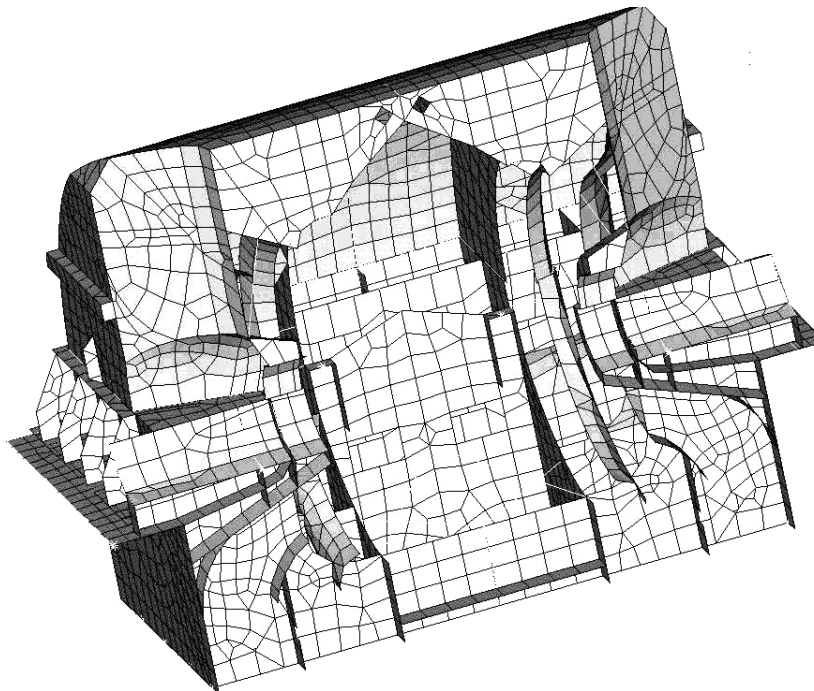


Рисунок 1 – Расчетная модель системы корпуса цилиндра низкого давления

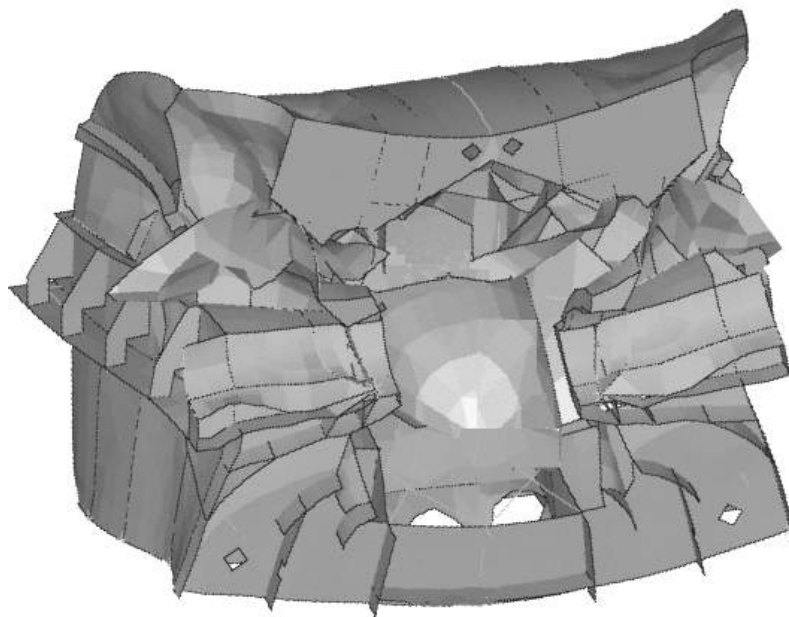


Рисунок 2 – Форма колебаний корпуса ЦНД вблизи основной моды

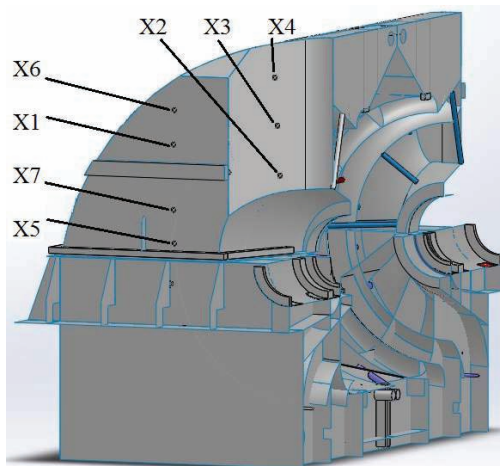


Рисунок 3 – Точки определения амплитуд вертикальных колебаний

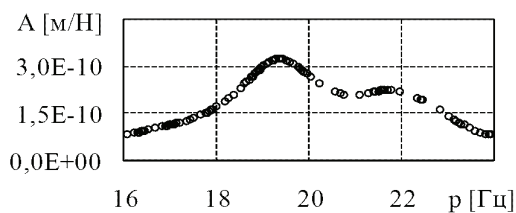


Рисунок 4 – Амплитуды колебаний в точке x1 корпуса ЦНД

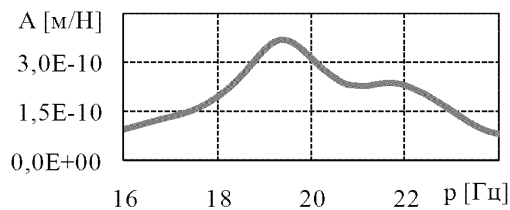


Рисунок 5 – Амплитуды колебаний в точке x2 корпуса ЦНД

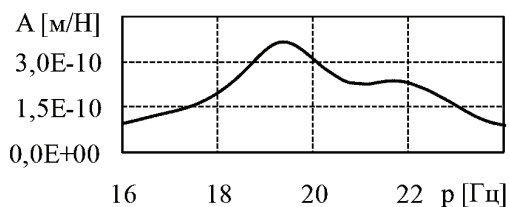


Рисунок 6 – Амплитуды колебаний в точке x3 корпуса ЦНД

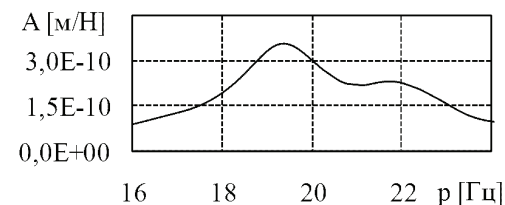


Рисунок 7 – Амплитуды колебаний в точке x4 корпуса ЦНД

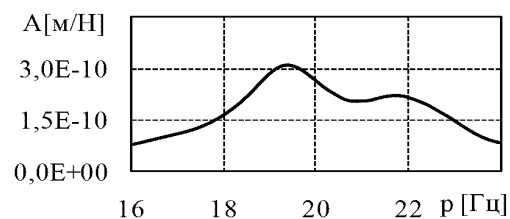


Рисунок 8 – Амплитуды колебаний в точке x5 корпуса ЦНД

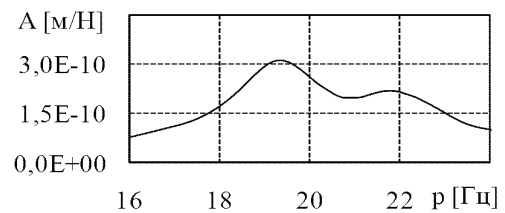


Рисунок 9 – Амплитуды колебаний в точке x6 корпуса ЦНД

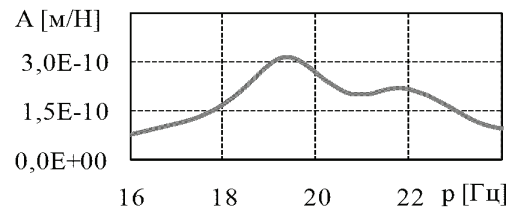


Рисунок 10 – Амплитуды колебаний в точке x7 корпуса ЦНД

Выводы. В результате моделирования и анализа вынужденных колебаний системы ТФО вблизи основной моды определены места повышенной вибрации на стенках корпуса цилиндра низкого давления. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для снижения общего уровня вибрации системы турбоагрегат-фундамент-основание и повышения надежности ее работы.

Список литературы

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. Санкт-Петербург: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2010. № 3. С.5-11.
4. Субботин В.Г., Левченко Е.В., Швецов В.Л. Паровые турбины ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций. Харьков: Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». 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. Tokyo: Japan. 2009. 104 p.
8. Назаренко С.А., Ткачук Н.А. Обзор некоторых ключевых направлений исследований ученых НТУ «ХПИ» в области динамики конструкций. Харків: Вісник НТУ «ХПИ». 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. Харків: Дослідження з історії техніки. 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. Харьков: Проблемы машиностроения. 2004. Т. 7, № 3. С. 39-47.
11. Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He, 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. Харьков: Вісник НТУ «ХП». 2017. № 39. С.23-26.

References (transliterated)

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 p. [in Russian].

2. Troyanovskii B.M. Turbiny dlya atomnykh elektrostantsii [Turbines for nuclear power plants] Moscow: Energiya, 1978. 182 p. [in Russian].

3. Levchenko E.V., Shvetsov V.L., Kozheshkurt I.I., Lobko A.N. 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 teplotekhnicheskie protsessy i oborudovanie. SantPeterburg, 2010. Vol. 3. P. 5-11 [in Russian].

4. Subbotin V.G., Levchenko E.V., Shvetsov V.L. Parovye turbiny OAO "Turboatom" dlya teplovykh elektrostantsii [Turboatom steam turbines for thermal power plants]. Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Kharkiv, 2009. Vol. 3. P. 6-17 [in Russian].

5. Eremenko S.Yu. Metody konechnykh elementov v mekhanike deformiruemyykh tel [Finite-element methods in mechanics of deformable bodies], Kharkiv: Osнова, 1991. 271 p. [in Russian].

6. Gallager R. Metod konechnykh elementov. Osnovy [The finite element method. Basedata] Moscow: Mir, 1984. 428 p. [in Russian].

7. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan, 2009. 104 p.

8. Nazarenko S.A., Tkachuk N.A. 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, 2017. Vol. 39. P. 49-56 [in Russian].

9. Larin A., Chumachenko O. Spivpratsya zaporiz'kikh aviadvigunobudivnykh pidpriemstv z providnymi vchenimi Ukraïni v galuzi dinamich-noï mitsnosti v 1950-1970-kh rr. [Co-operation Zaporizhzhya aviation engine-building companies with the leading scientists of Ukraine in the field of dynamic strength in the 1950-1970] Doslidzhennya z istorii tekhniki. Kharkiv, 2016. Vol. 23. P. 72-78 [in Ukrainian].

10. Zhovdak V.O., Krasnikov S.V., Stepchenko O.S. 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, 2004. Vol. 3. P. 39-47 [in Russian].

11. Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He, Lei Xiao A Seismic Analysis on Steam Turbine Con-sidering Turbine and Foundation Interaction. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf. 2014. V01BT27A041. P. 1-8.

12. Alan Turnbull Corrosion pitting and environmen-tally 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. Runov B.T. Issledovanie i ustranenie vib-ratsii parovykh turboagregatov [Research and elimination of the vibration of the steam turbine units] Moscow: Energoizdat, 1982. 352 p. [in Russian].

15. Gallager R. Metod konechnykh elementov. Osnovy [The finite element method. Basedata], Moscow: Mir, 1984. 428 p. [in Russian].

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. Krasnikov S.V. Modelirovanie i analiz vib-ratsionnykh kharakteristik korpusa parovoi tur-biny bol'shoi moshchnosti [Modeling and analysis of the vibration characteristics of a high-power steam turbine hull]. Visnik NTU "KhPI". Kharkiv, 2017. Vol. 39. P. 23-26 [in Russian].

Поступила (received) 24.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Красников Сергей Васильевич (Красніков Сергій Васильович, Krasnikov Sergij Vasylovych) кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет: тел. (+038057) 707-37-30; e-mail: vsevkr@yandex.ru