

*С.В. КРАСНИКОВ***МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ТУРБОАГРЕГАТА МОЩНОСТЬЮ 500 МВт**

Проведено моделирование системы турбоагрегат-фундамент-основание с турбиной мощностью 500 МВт. Объектом исследования являются наиболее гибкие элементы системы - корпуса цилиндров низкого давления. В исследовании рассматривается паровая турбина, которая содержит четыре типовых корпуса. Для моделирования и проведения численных расчетных исследований использован метод конечных элементов. Построены геометрические и конечно-элементные модели элементов системы турбоагрегат-фундамент-основание и всей системы в целом. Проведены расчеты собственных колебаний. Получены значения собственных частот и собственные формы колебаний. Полученные результаты позволяют дать качественную оценку вибрационного состояния системы турбоагрегат-фундамент-основание и выявить причины повышенной вибрации отдельных ее элементов.

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

*С.В. КРАСНИКОВ***МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ТУРБОАГРЕГАТА МОЩНОСТЬЮ 500 МВт**

Проведено моделювання системи турбоагрегат-фундамент-основа з турбіною потужністю 500 Мвт. Об'єктом дослідження є найбільш гнучкі елементи системи - корпуси циліндрів низького тиску. У дослідженні розглядається парова турбіна, що містить чотири типових корпуси. Для моделювання та проведення чисельних розрахункових досліджень використаний метод скінчених елементів. Побудовано геометричні та скінчено-елементні моделі елементів системи турбоагрегат-фундамент-основа та всієї системи в цілому. Проведено розрахунки власних коливань. Отримано значення власних частот та власні форми коливань. Отримані результати дозволяють дати якісну оцінку вібраційного стану системи турбоагрегат-фундамент-основа та виявити причини підвищеної вібрації окремих її елементів.

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

*S.V. KRASNIKOV***MODELING AND ANALYSIS OF OWN VIBRATIONS OF THE CASE ELEMENTS
OF THE TURBO UNIT WITH CAPACITY 500 MW**

The modeling of the turbo unit-foundation-base system with turbine with a capacity of 500 MW is carried out. The object of research is the most flexible elements of the system - the body of low pressure cylinders. Determining the spectrum of vibrations of body elements of turbine units is a complex task. In most cases, the spectrum of vibrations is determined experimentally. As a rule, the spectrum of vibrations of body elements is determined for a set of measures to eliminate the increased level of vibration. That is, attention to the phenomenon of resonance is often applied after almost repeated fixation of the presence of increased vibration. These facts include increased noise, the presence of clearly deformed body elements, emergency stops of the power unit. Mathematical modeling of the spectrum of vibrations of body elements of a turbine unit is a complex task. On the one hand, the complexity of the task is due to the large volume of work of three-dimensional modeling of units of the power unit to create a reliable model with more degrees of freedom. On the other hand, the complexity of the problem is related to the peculiarities of taking into account the nonlinear characteristics of the elements of the turbo unit-foundation-base system and the connections between the complex elements of the system. However, in order to prevent and eliminate emergencies associated with vibrational reliability, it is necessary to conduct calculations based on spatial models of the power unit with a sufficient number of degrees of freedom. The study examines a steam turbine containing four typical enclosures. For the simulation and conduct of numerical computational studies, the method of finite elements is used. The geometric and finite-element model elements of the turbo-base-base system and the whole system as a whole are constructed. Calculations of own oscillations are carried out. The eigenfrequencies and their own oscillations are obtained. The obtained results allow us to give a qualitative estimate of the vibration state of the turbo unit-foundation-base system and to identify the causes of increased vibration of its individual elements.

Keywords: vibration, steam turbine, low pressure case, finite element method, own oscillations, foundation.

Введение. Энергетика большинства стран преимущественно основывается на использовании тепловых и атомных электростанций. Надежность работы энергетических установок этих электростанций существенно зависит от спектра вибраций корпусов турбоагрегатов. Наличие собственных частот вблизи рабо-

чей частоты приводит к явлению резонанса и является причиной аварийных ситуаций. Определение спектра вибраций корпусных элементов турбоагрегатов является сложной задачей [1, 2]. В большинстве случаев спектр вибраций определяют экспериментально. Как правило, спектр вибраций корпусных элементов опре-

деляется для комплекса мероприятий для устранения повышенного уровня вибраций. То есть внимание на явление резонанса часто обращается практически после неоднократной фиксации фактов наличия повышенной вибрации. Этими фактами являются повышенный шум, наличие явно выраженных деформаций корпусных элементов, аварийные остановки энергоблока. Математическое моделирование спектра вибраций корпусных элементов турбоагрегата является сложной задачей. С одной стороны сложность задачи обусловлена большим объемом работ трехмерного моделирования частей энергоблока по созданию достоверной модели с большим количеством степеней свободы. С другой стороны сложность задачи связана с особенностями учета нелинейных характеристик элементов системы турбоагрегат-фундамент-основание и связей между составными элементами указанной системы. Однако для предупреждения и устранения аварийных ситуаций, связанных с вибрационной надежностью необходимо проведение расчетных исследований на основе пространственных моделей энергоблока с достаточным количеством степеней свободы. Это приводит к постановке ряда задач в нелинейной постановке [3]. Решение части этих задач представлено ниже в описании проведенных исследований.

Цель работы. Построение пространственной модели системы турбоагрегат-фундамент-основание и проведение расчетных исследований спектра вибраций корпусных элементов турбоагрегата. Объектом исследований является корпус цилиндров низкого давления паровой турбины мощностью 500 МВт. Предметом исследования являются собственные частоты и формы колебаний всей системы турбоагрегат-фундамент-основание и отдельных ее элементов: фундамента и корпусных элементов турбины.

Математическая модель. Для моделирования и проведения расчетных исследований использован метод конечных элементов. Основной функционал задачи:

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

где O – различные состояния связи корпусов турбины с фундаментом, L – уравнение Лагранжа 2-го рода, q – обобщенные перемещения.

В методе конечных элементов [4] функционал (1) представлен в 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.

Собственные частоты системы p_j определяются из формулы (3):

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

Описание объекта исследований. Система турбоагрегат-фундамент-основание с турбиной мощностью 500 МВт традиционно состоит из железобетонного фундамента, в который установлен турбогенератор и паровая турбина [1, 2]. Фундамент, в свою оче-

редь, устанавливается на основание машинного зала электростанции. Рассматриваемая паровая турбина состоит из девяти элементов: четыре цилиндра низкого давления (ЦНД), четыре конденсатора и один цилиндр высокого давления (ЦВД). ЦНД с конденсаторами идентичны между собой и установлены в фундамент симметрично относительно ЦВД. Общий вид ЦНД с конденсатором показан на рис. 1. Наиболее гибкими конструкциями системы турбоагрегат-фундамент-основание являются корпуса ЦНД. Вторыми после них являются колонны, ригели и балки железобетонного фундамента, которые имеют значительно большую жесткость и демпфирующие свойства. Корпус ЦНД состоит из большого числа балок и листов различной толщины, профиля и кривизны. Моделирование ЦНД является достаточно сложной и трудоемкой задачей.

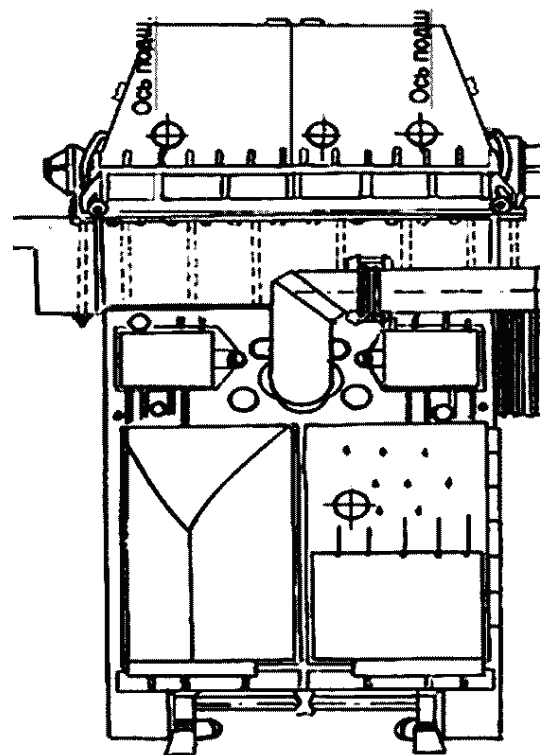


Рисунок 1 – ЦНД с конденсатором на фундаменте

Описание расчетной модели. На основе ранее разработанных подходов и методик [5-9] моделирование системы турбоагрегат-фундамент-основание проводилось поэлементно. Железобетонный фундамент моделировался с помощью системы стержневых конечных элементов. Корпус ЦНД (рис. 2, 3) моделировался с помощью стержневых и оболочечных стержневых конечных элементов, остальные элементы ЦНД моделировались массами и граничными условиями. Генератор, ЦВД и конденсаторы моделировались с помощью масс и системы граничных условий. Связи между фундаментом и остальными частями системы моделировались системой стержней и граничных условий. В результате была построена конечноэлементная модель из 27040 узлов и 23165 конечных элементов, которая показана на рис. 4.

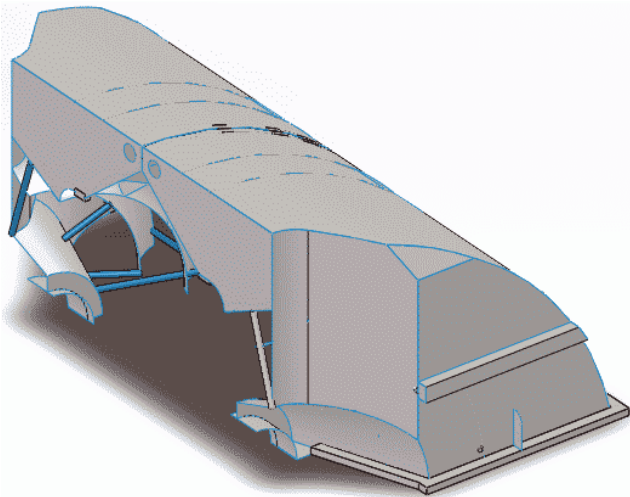


Рисунок 2 – Разрез верхней части корпуса ЦНД

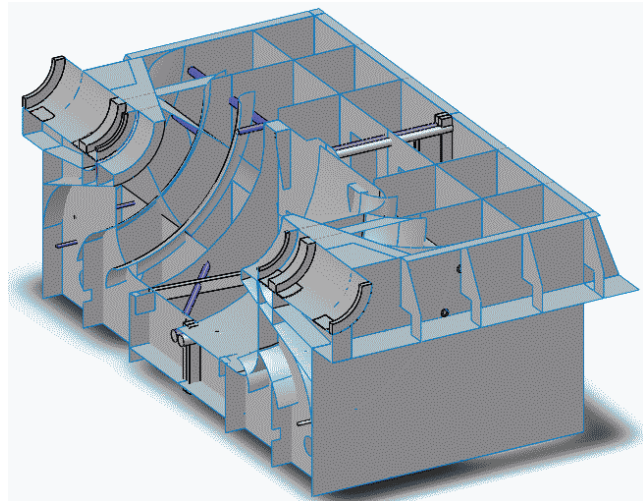


Рисунок 3 – Разрез нижней части корпуса ЦНД

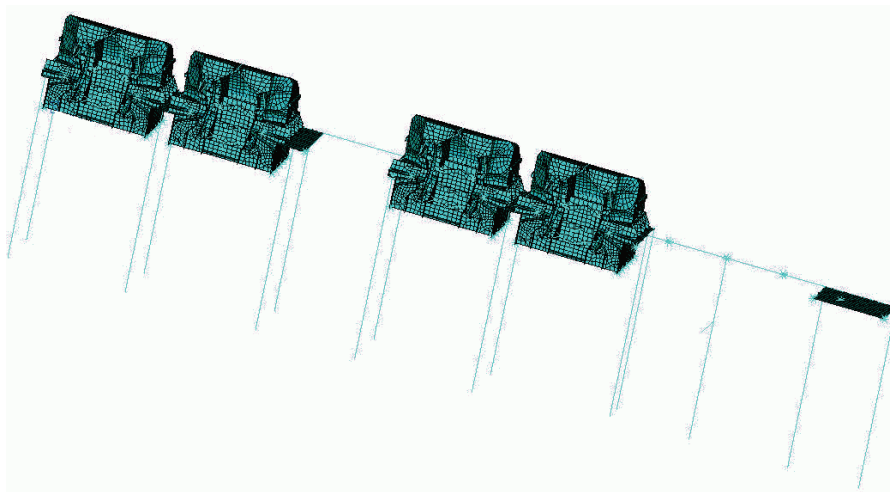


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель системы с турбоагрегатом 500 МВт

Результаты численных исследований. В результате расчетов получены спектры вибраций и собственные формы колебаний системы и ее элементов. В табл. 1 приведены собственные частоты фундамента, а в табл. 2 - собственные частоты системы турбоагрегат-фундамент-основание в диапазоне 0 - 55 Гц.

Из сравнения таблиц 1 и 2 видно, что количество собственных частот у системы турбоагрегат-фундамент-основание значительно больше, чем у фундамента. Это различие связано с собственными частотами корпусов ЦНД. Фактически каждый корпус ЦНД имеет в диапазоне 0 - 55 Гц по 10 собственных частот, но в связи с наличием близких частот фундамента, появилось большое собственных частот, кото-

рым соответствуют смешанные собственные формы колебаний фундамента и корпусных элементов ЦНД турбины. Следует отметить, что только пяти собственным частотам корпуса ЦНД соответствуют глобальные формы колебаний корпуса ЦНД, которые существенным образом влияют на вибрацию опор роторов. Собственные формы колебаний ЦНД можно разделить на три группы: глобальные формы колебаний совместно верхней и нижней части, ассиметричные формы колебаний верхней и нижней части, локальные формы колебаний преимущественно отдельных стержней и пластин или их комбинаций. Наибольший интерес представляют собственные частоты и формы колебаний в рабочем диапазоне 48 – 52 Гц.

Таблица 1 – Собственные частоты фундамента, Гц

№	Частота	№	Частота	№	Частота	№	Частота	№	Частота
1	12,3	9	25,2	17	33,2	25	34,9	33	45,0
2	12,4	10	25,6	18	33,4	26	35,5	34	45,6
3	19,2	11	26,5	19	33,4	27	36,3	35	49,3
4	21,3	12	27,3	20	33,6	28	36,5	36	51,0
5	24,8	13	29,8	21	33,7	29	38,7	37	54,2
6	25,0	14	31,8	22	33,8	30	40,8	38	55,2
7	25,1	15	32,4	23	34,3	31	41,2	39	55,6
8	25,2	16	33,1	24	34,5	32	43,0		

Таблица 2 – Собственные частоты системы турбоагрегат-фундамент-основание, Гц

№	Частота	№	Частота	№	Частота	№	Частота	№	Частота	№	Частота
1	13,1	20	24,7	39	31,1	58	36,5	77	43,7	96	49,2
2	13,6	21	24,8	40	31,1	59	36,6	78	43,9	97	49,4
3	14,7	22	24,8	41	31,1	60	36,8	79	44,1	98	50,2
4	16,4	23	24,8	42	31,1	61	37,6	80	44,3	99	51,0
5	17,0	24	24,9	43	31,2	62	37,9	81	44,3	100	51,2
6	17,0	25	25,1	44	31,4	63	37,9	82	44,3	101	51,5
7	17,0	26	25,2	45	31,9	64	37,9	83	44,3	102	51,8
8	17,0	27	25,2	46	32,4	65	37,9	84	44,4	103	52,3
9	17,8	28	25,2	47	32,7	66	37,9	85	44,4	104	52,6
10	18,7	29	25,5	48	33,6	67	37,9	86	44,6	105	53,8
11	18,8	30	25,9	49	33,8	68	37,9	87	44,7	106	53,9
12	19,0	31	26,0	50	34,0	69	37,9	88	45,6	107	54,5
13	19,3	32	27,0	51	34,6	70	40,0	89	45,7	108	54,7
14	19,9	33	28,4	52	34,9	71	40,8	90	46,1	109	54,9
15	21,5	34	28,8	53	35,6	72	40,8	91	46,4		
16	21,6	35	29,2	54	35,7	73	40,8	92	47,3		
17	23,2	36	30,8	55	36,2	74	40,8	93	47,8		
18	23,9	37	31,0	56	36,5	75	41,0	94	48,5		
19	24,6	38	31,0	57	36,5	76	42,1	95	49,0		

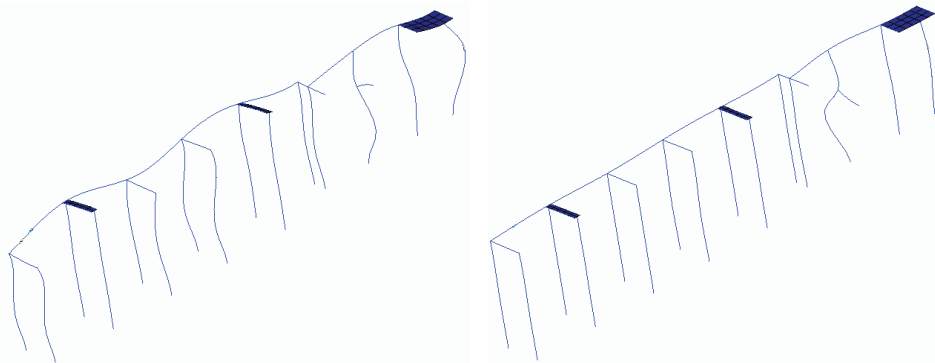


Рисунок 5 – Собственные формы колебаний фундамента на частотах 49,3 Гц (слева) и 51 Гц (справа).

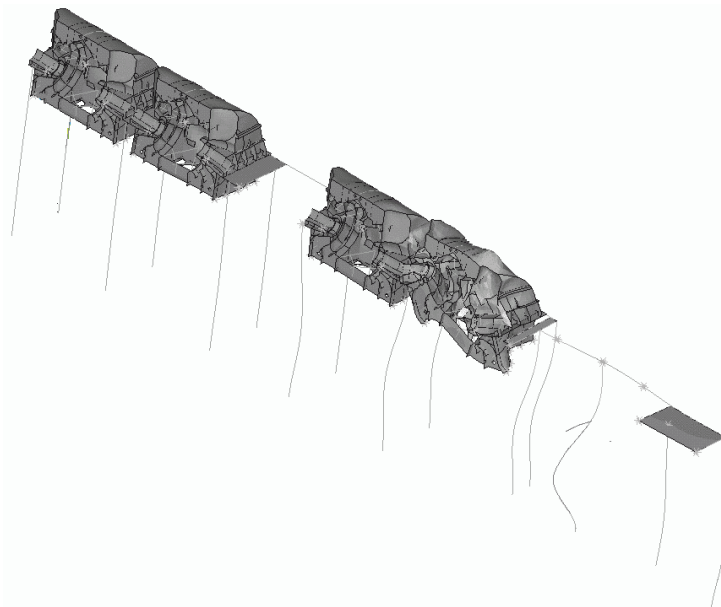


Рисунок 6 – Собственная форма колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание на частоте 51,2 Гц .

В указанном диапазоне находятся две собственные частоты фундамента (49,3 Гц, 51 Гц) и семь собственных частот связанных преимущественно с колебаниями корпусов ЦНД. На рис. 5 представлены соб-

ственные формы колебаний фундамента на частотах 49,3 Гц и 51 Гц. Соответствующие собственные формы колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание (48,5 Гц, 51,2 Гц) характеризуются повы-

шенным уровнем колебаний одного корпуса ЦНД, ближайшего со стороны генератора (рис.6). Это связано с наличием максимальных амплитуд колебаний в колоннах фундамента возле генератора. Остальные семь форм колебаний связаны преимущественно с двумя собственными формами колебаний корпусов ЦНД (тип А и Б), которые показаны на рис. 7.

Собственная форма колебаний корпуса ЦНД типа А (рис. 7, слева) является глобальной формой колебаний совместно верхней и нижней части, максимальные амплитуды колебаний достигаются в средней части корпуса. Собственная форма колебаний корпуса ЦНД типа Б (рис. 7, справа) является глобальной асимметричной формой колебаний верхней и нижней

части, максимальные амплитуды колебаний достигаются в боковых частях корпуса, минимальные значения амплитуд колебаний в средней части корпуса.

Собственной частоте системы 48,5 Гц соответствует форма колебаний ближайшего к генератору корпуса ЦНД по типу А. Собственной частоте системы 51,2 Гц соответствует форма колебаний ближайшего к генератору корпуса ЦНД по типу Б.

Собственным частотам системы 49 Гц, 49,2 Гц, 49,4 Гц соответствуют комбинации форм колебаний корпусов ЦНД по типу А. Собственным частотам системы 50,2 Гц, 51 Гц, 51,5 Гц, 51,8 Гц соответствуют комбинации форм колебаний корпусов ЦНД по типу Б (рис. 8).

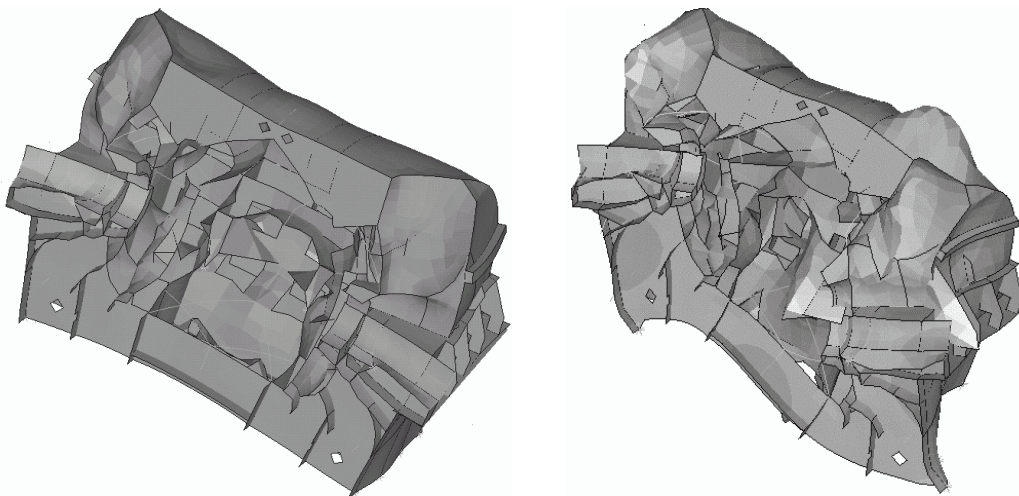


Рисунок 7 – Собственные формы колебаний корпуса ЦНД тип А (слева) и Б (справа)

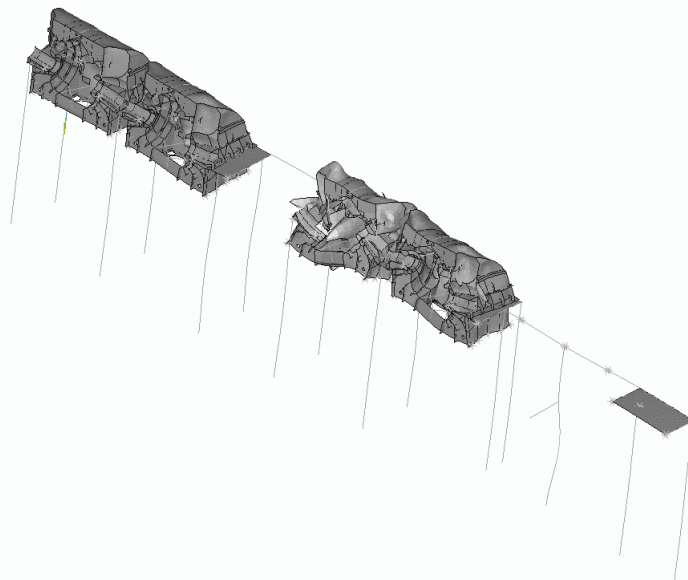


Рисунок 8 – Собственная форма колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание на частоте 51 Гц

Выводы. Проведено моделирование корпусных элементов турбины мощностью 500 МВт и системы турбоагрегат-фундамент-основание. Сравнение собственных частот системы и ее элементов показал наличие значительно большего числа частот у всей системы по сравнению с количеством частот ее элементов.

Анализ собственных форм колебаний показал, что причиной значительного увеличения собственных частот системы является следствием наличия большого числа комбинированных собственных форм с различным сочетанием колебаний корпусов турбины и фундамента.

Список литературы

1. Рунов Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов / Б.Т. Рунов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
2. Шульженко Н.Г. Численный анализ колебаний систем турбоагрегат-фундамент / Н.Г. Шульженко, Ю.С. Воробьев. – К.: Наук. думка, 1991. – 232 с.
3. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. – Tokyo: Japan, 2009. – 104 p.
4. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С.Ю. Еременко. – Х.: Основа, 1991. – 271 с.
5. Zhiqiang Hu A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and Foundation Interaction / Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He, Lei Xiao // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition Volume 1B. – Düsseldorf: International Gas Turbine Institute, 2014. – PP. V01BT27A041, 8 p.
6. Turnbull A. Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth / A. Turnbull // Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. – London: The Royal Society, 2014. – PP. 20140254, 19 p.
7. Adhhikari Sukanta Turbo-Generator Foundation / Adhhikari Sukanta // Structural Engineering Forum of India. – New Delhi: SEFI, 2010. – P. 1-19.
8. Chowdhury Indrajit Dynamics of Structure and foundation a unified approach / Chowdhury Indrajit, Dasgupta P. Shambhu. – Leiden: CRC Press, 2009. – 616 p.
9. Gu Ping New dynamic participation factor for turbine generator foundation Practice Periodical on Structural Design and Construction / Gu Ping // VA.: American Society of Civil Engineers, 2009. – № 15 (1). – P. 54-62.
10. Жовдак В.О. Решение задачи статистической динамики машиностроительных конструкций с учетом случайного изменения параметров / В.О. Жовдак, С.В. Красников, О.С. Степченко // Проблемы машиностроения. – Х.: Контраст, 2004. – Т. 7, № 3. – С. 39-47.
11. Красников С.В. Моделирование и анализ вибрационных характеристик корпуса паровой турбины большой мощности / С.В. Красников // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39. – С.23-26.

References (transliterated)

1. Runov B.T. Issledovanie i ustranenie vibracii parovyh turboagregatov. Moscow: Energoizdat, 1982. 352 p.
2. Shul'zhenko N.G., Vorob'ev Yu.S. Chislennyj analiz kolebanij sistem turboagregat-fundament. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 232 p.
3. HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan, 2009. 104 p.
4. Eremenko S. Yu. Metody konechnyh elementov v mehanike deformiruemyh tel. Kharkiv: Osнова, 1991. 271 p.
5. 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. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition Volume 1B. Düsseldorf: International Gas Turbine Institute, 2014. PP. V01BT27A041, 8 p.
6. Alan Turnbull. Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. London: The Royal Society, 2014. PP. 20140254, 19 p.
7. Adhhikari Sukanta Turbo-Generator Foundation. Structural Engineering Forum of India. New Delhi: SEFI, 2010. P. 1-19.
8. Chowdhury Indrajit, Dasgupta P. Shambhu Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Leiden: CRC Press, 2009. 616 p.
9. Gu Ping New dynamic participation factor for turbine generator foundation Practice Periodical on Structural Design and Construction. VA.: American Society of Civil Engineers, 2009. No 15(1). P. 54-62.
10. Zhovdak V.O., Krasnikov S.V., Stepchenko O.S. Reshenie zadachi statisticheskoy dinamiki mashinostroitel'nyh konstrukcij s uchetom sluchajnogo izmeneniya parametrov. Problemy mashinostroeniya. Kharkiv: Kontrast, 2004. Vol. 7, No 3. P. 39-47.
11. Krasnikov S.V. Modelirovanie i analiz vibracionnyh harakteristik korpusa parovoj turbiny bol'shoj moschnosti. Visnik NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. No 39. P. 23-26.

Надійшло (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Красніков Сергій Васильович (Красников Сергей Васильевич, Krasnikov Sergij Vasyl'ovych) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет: тел. (+038057) 707-37-30; e-mail: vsevkr@yandex.ru