

А.С.СТЕПЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»"

АЛГОРИТМ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТУРБОАГРЕГАТ – ФУНДАМЕНТ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

У даній статті пропонується алгоритм структурної оптимізації системи турбоагрегат- фундамент для забезпечення припустимого рівня вібрацій вбудованих опор ротора низького тиску. На основі проведеного аналізу взаємозалежних коливань фундаменту і корпусів низького тиску показана можливість роздільної оптимізації на моделях симетричних частин фундаменту та корпусу турбіни шляхом вбудовування нових стрижневих елементів.

In given paper the algorithm of structural optimisation of system the turbine-base for guarantee of an allowance of vibrations of offset bearing support of a low pressure rotor is offered. On the basis of the conducted analysis of interdependent vibrations of the base and casies of low pressure the capability of separate optimisation on models of symmetric parts of the base and the turbine casing by embedding of new beam elements is displayed.

1. Введение

Обеспечение допустимых вибрационных характеристик системы турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО) на атомных и тепловых электростанциях по-прежнему является актуальной задачей. Установка все более мощных турбин с пониженной материалоемкостью и улучшенными аэродинамическими характеристиками на рамные фундаменты приводит к повышению податливости цилиндров низкого давления (ЦНД). В результате в системе ТФО возникает густой спектр частот в рабочем диапазоне, а для многокорпусных турбин мощностью свыше 500Мвт ситуация ухудшается за счет расстройки частот ЦНД [1-3]. При этом параметрическая конструкционная оптимизация (то есть ужесточение существующих элементов корпуса ЦНД и фундамента) хотя и приводит к некоторому снижению уровня вибраций, принципиально не убирает резонансные частоты из рабочего диапазона [2,4]. Поэтому актуальной становится задача структурной оптимизации – оптимальный подбор дополнительных структурных элементов встраиваемых в конструкцию, которые значительно меняют жесткостные характеристики системы в целом и принципиально устраняют резонансные частоты в рабочем диапазоне. Несмотря на наличие множество исследований в области оптимизации формы конструкции [5,6], задача структурной оптимизации не имеет общего подхода и разработанного алгоритма решения из-за неопределенности выбора места присоединения дополнительных структурных элементов и их формы.

2. Постановка задачи

Для системы ТФО необходимо разработать эффективный алгоритм оптимального выбора дополнительных структурных связей в виде стержней с

целью отстройки от резонанса в рабочем диапазоне частот.

Особенностью системы ТФО является то, что элементы системы – турбоагрегат и фундамент представляют собой сложные пластинчато-оболочечно-стержневые конструкции. Для достоверного определения собственных частот таких систем необходимо использовать только современные системы инженерного анализа с хорошим интерфейсом (CAE), которые обеспечивают точное моделирование геометрии конструкции, но требуют много времени для расчета. Так как при оптимизации необходимо многократно решать задачу анализа, то для сокращения времени счета предлагается использовать суперэлементный подход.

Особенностью задачи оптимального выбора новых структурных связей является, то, что частотные характеристики системы ТФО в этом случае изменяются случайным образом. Поэтому необходимо определить принципы, на основе которых будут выбираться места наложения связей и логика их перебора. При этом необходимо учесть технологические, конструкционные и аэродинамические ограничения на места наложения стержневых связей.

3. Анализ динамического взаимодействия фундамента и паровой турбины в системе ТФО

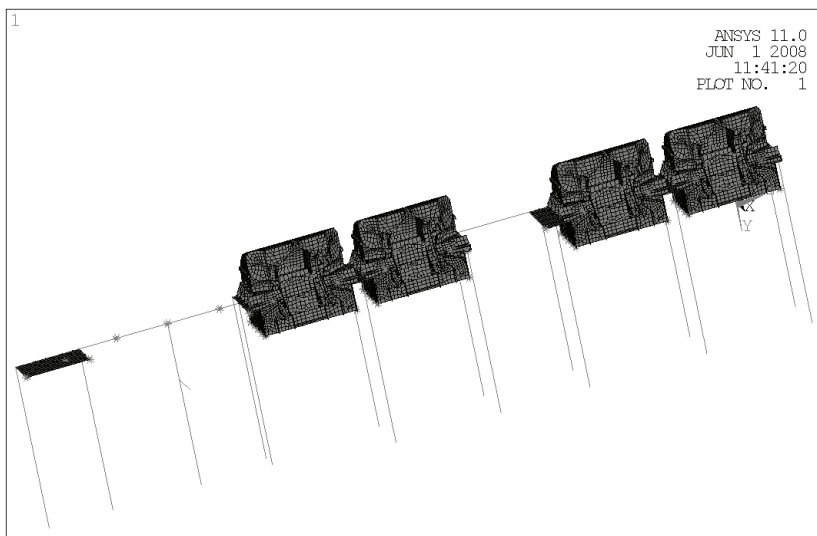


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель системы турбоагрегат-фундамент

Система турбоагрегат-фундамент включает паровую турбину, генератор, возбудитель генератора и рамный фундамент. Паровая турбина состоит из цилиндров низкого (ЦНД), среднего (ЦСД) и высокого (ЦВД) давления,

причем ЦНД может быть несколько. Так турбина К-500-65/3000, модель которой приведена на рис. 1, включает 4 ЦНД. Система ТФО имеет одну плоскость симметрии, поэтому для исследования колебаний достаточно смоделировать симметричную часть системы [1]. Конечно-элементная модель симметричной части рамного фундамента под турбину К-560-23,5 представлена на рис. 2, а симметричной $\frac{1}{4}$ части одного из двух ЦНД данной турбины представлена на рис. 3.

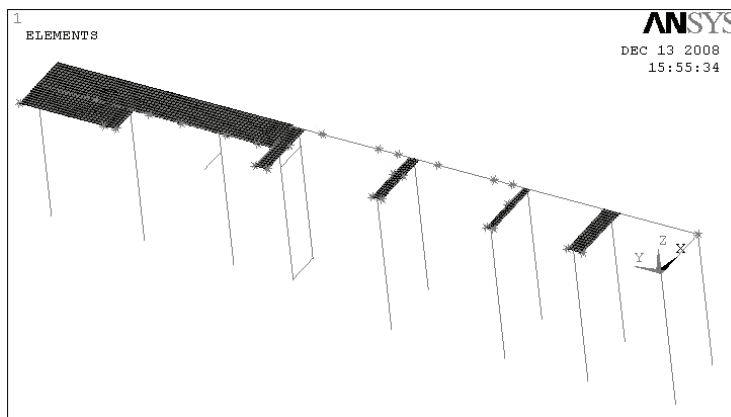
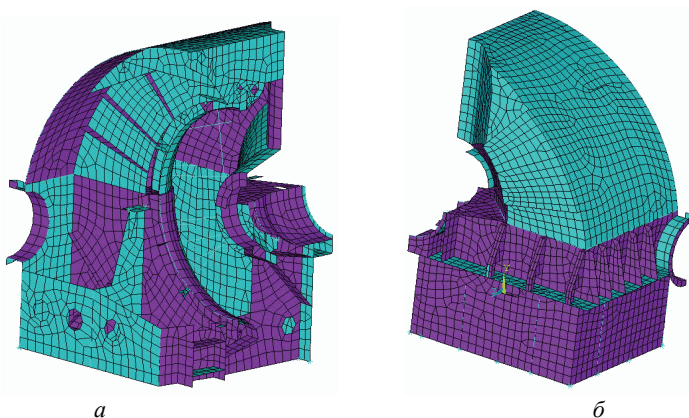


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель фундамента



a *б*
Рисунок 3 – Конечно-элементная модель $\frac{1}{4}$ ЦНД
а – вид изнутри, б – вид снаружи

Тиражированием модели $\frac{1}{4}$ ЦНД легко получить четыре либо две половины ЦНД и соединить с моделью фундамента. При этом передаваемая на ЦНД масса конденсатора, обоймы и ротора учитывается как сосредоточен-

ные массы. Так как остальное оборудование либо очень жесткое (ЦВД, возбудитель генератора), либо его жесткость не влияет на колебания ЦНД, его можно заменить сосредоточенными массами в местах опирания на фундамент [1]. В построенных конечно-элементных моделях симметричной части системы турбоагрегат-фундамент использованы конечные элементы массы, стержня и оболочки [1].

Анализ частотного спектра и собственных форм колебаний системы ТФО для многокорпусных турбоагрегатов [2,3] показал, что формы колебаний можно разделить на:

- чисто фундаментные, которые определяются колебаниями фундамента, корпуса ЦНД турбины не колеблются;
- чисто корпусные, фундамент не колеблется;
- смешанные, совместные колебания фундамента и корпусов ЦНД.

При этом также наблюдается расстройка, то есть по одной форме колебаний возбуждаются разные ЦНД на близких частотах.

Данные особенности форм колебаний системы ТФО, позволяют поставить вопрос – нельзя ли оценить частоты системы ТФО в целом по частотам ее составляющих? Т.е. рассмотреть частотный спектр ТФО как сумму частотных спектров отдельного фундамента и отдельного корпуса ЦНД. Подобный анализ позволит не только значительно сократить размерность задачи, но выявить причинно-следственные связи возбудимости опасных частот.

Для такого анализа были взяты модели фундамента с массами оборудования (рис. 2) и корпуса с упругими связями в местах крепления на фундамент (рис. 3) для турбины К-560-23,5. Величина упругой связи была взята равной средней величине динамической податливости фундамента в точках опирания ЦНД. Первые двадцать собственных частот ТФО К-560-23,5 приведены в табл. 1. Также в табл. 1 приведены собственные частоты отдельного фундамента и отдельного ЦНД, собственные формы которых совпадают с собственными формами системы ТФО. Как видно из табл. 1 большая часть частот практически совпадает с частотами отдельного фундамента, и эти частоты соответствуют чисто фундаментным собственным формам. Одна частота (пятая), соответствующая корпусной форме, близка к частоте отдельного ЦНД, разницу можно объяснить завышением жесткости упругих связей в местах крепления. Особый интерес представляют 1-я, 8-я и 9-я собственные частоты – они соответствуют смешанным формам колебаний. Особенностью их является то, что соответствующие этим формам частоты отдельного фундамента и отдельного ЦНД близки между собой. При этом возбуждение смешанной формы ТФО происходит на новой частоте лежащей выше, чем частоты отдельных структурных элементов системы. Кроме этого, в этом случае, максимальные амплитуды на форме отдельного фундамента соответствуют тем участкам, на которые опирается ЦНД. Такая же взаимосвязь наблюдается и для остального спектра частот в рабочем диапазоне частот 0-50 Гц.

Таблица 1 – Собственные частоты системы ТФО, фундамента и ЦНД

№	Частота (Гц)		
	ТФО	Фундамент	ЦНД
1	5,740	3,29	5,12
2	8,891	10,57	-
3	10,830	10,79	-
4	10,859	10,85	-
5	14,277	-	15,62
6	15,328	15,31	-
7	15,802	15,87	-
8	18,607	16,66	15,62
9	18,693	16,66	15,62
10	19,056	19,34	-
11	19,446	19,39	-
12	20,518	-	-
13	21,124	21,08	-
14	21,571	21,26	-
15	21,662	21,44	-
16	21,740	21,73	-
17	21,790	21,91	-
18	24,357	23,10	-
19	26,158	26,38	-
20	26,544	26,96	-

На рис. 4 и рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вертикальных податливостей в наиболее важной точке – опоре подшипника ЦНД на фундамент для двух моделей: ТФО и отдельный фундамент, соответственно многокорпусных турбин К-560-23,5 и К-500-65/3000.

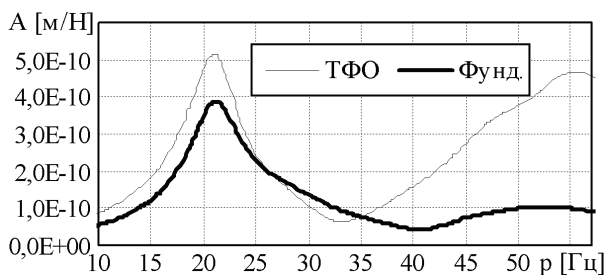


Рисунок 4 – АЧХ в месте опоры подшипника для моделей ТФО и фундамента турбины К-560-23,5

В первом случае ЦНД турбины К-560-23,5 (рис. 4) в районе рабочей час-

тоты 50 Гц имеет две собственных частоты (49,3 Гц и 52,4 Гц), во втором случае (рис. 5) ЦНД турбины К-500-65/3000 в районе рабочей частоты собственных частот не имеет. Однако во втором случае есть собственные частоты фундамента. Это и приводит к повышенным вибрациям опор подшипников на рабочей частоте 50 Гц в обоих случаях.

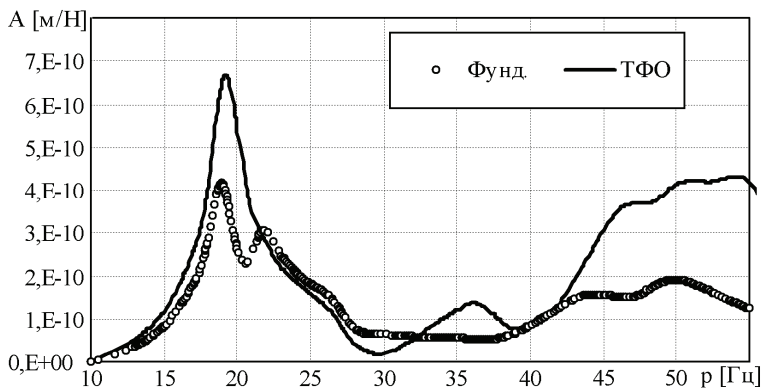


Рисунок 5 – АЧХ в месте опоры подшипника для моделей ТФО и фундамента турбины К-500-65/3000

Из проведенного анализа можно утверждать, что если для моделей фундамента с массами оборудования и ЦНД на упругих опорах отдельно получить спектры собственных частот такие, что в рабочем диапазоне 40-55 Гц не будет собственных частот, то и для системы ТФО в целом резонансных частот в рабочем диапазоне тоже не будет.

4. Алгоритм структурной оптимизации системы ТФО

На основании проведенного в разделе 3 анализа предложен алгоритм структурной оптимизации системы турбоагрегат-фундамент - основание для обеспечения заданной динамической податливости выносных опор подшипников ЦНД, представленный на рис. 6.

Для блоков построения моделей фундамента, ЦНД и системы ТФО в целом, а также для определения собственных частот предполагается использовать комплексы инженерного анализа на основе МКЭ.

Отдельную проблему представляет алгоритм блока структурной оптимизации на схеме рис. 6, то есть поиск оптимального места и вида новой структурной связи в конструкции. Для построения его предлагается воспользоваться следующими теоретическими положениями:

- теоремой о наложении связей [7], которая говорит, что наложение жестких дополнительных связей в системе с конечным числом степеней свободы повышает ее собственные частоты;
- тем, что жесткость стержней на растяжение-сжатие на два порядка

выше жесткости на изгиб, поэтому необходимо выбирать направление стержня (связи) таким образом, чтобы новая стержневая связь работала на растяжение-сжатие.

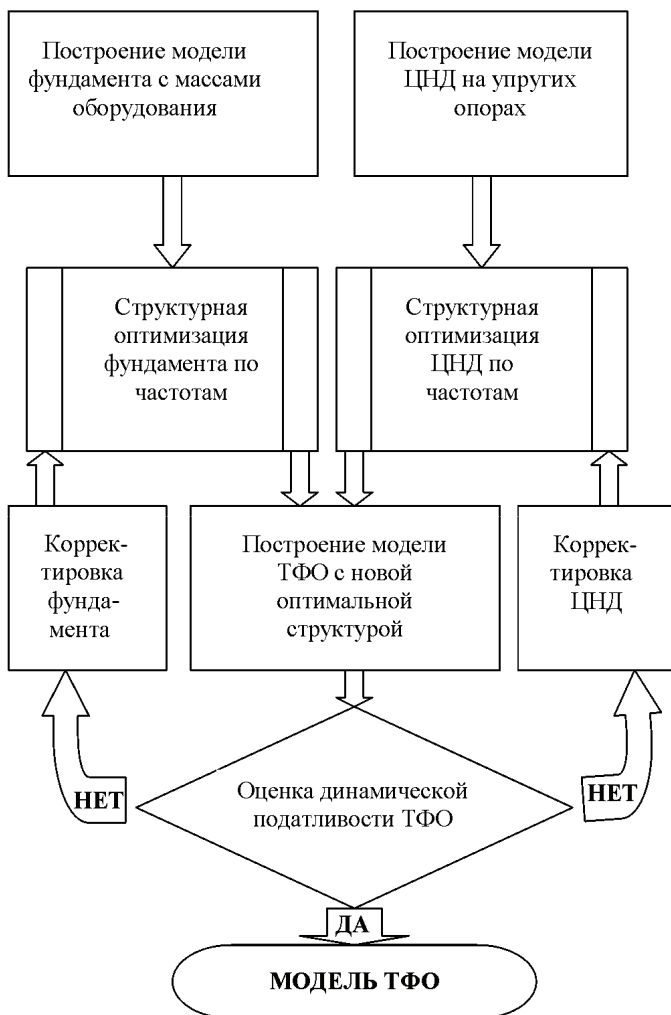


Рисунок 6 – Схема алгоритма структурной оптимизации системы ТФО

В первом приближение алгоритм поиска оптимального положения стержневой связи следующий:

- анализ движения конструкции для отстраиваемой формы колебаний;
- выбор точек с минимальной амплитудой колебаний (жестких точек);

- выбор точек с максимальной амплитудой колебаний (податливых точек);
- создание наборов пар точек в модели, наложение продольной связей между которыми максимально препятствовало главному (превалирующему) колебательному движению формы колебаний;
- наложение абсолютно жесткой связи между ними – $u_{x1} = u_{x2}$.
- выбор наиболее чувствительных пар точек на основе анализа спектра частот модели с жесткими связями;
- наложение стержневой связи на чувствительные пары точек с жесткостью реальных стержней;
- подбор параметров стержней на основе параметрической оптимизации.

Если оптимизация односвязанными стержнями не дает результат, то предполагается модифицировать данный алгоритм структурными связями типа стержневых ферм (треугольник, трапеция, крест и т.п.).

Выводы

1. Проведен анализ динамического взаимодействия фундамента и корпусов ЦНД в системе ТФО для многокорпусных турбоагрегатов.
2. Предложен алгоритм оптимизации динамических характеристик системы ТФО на основе раздельной оптимизации структурных элементов системы.
3. Предложен алгоритм оптимального поиска структурной связи стержневого вида.

Список литературы: 1. *Степченко А.С.* Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент // Дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Харьков. Гос. политех. ун-тет, 1994. – 194 с. 2. *Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С., Торяник А.В.* Исследование явления расстройки в многокорпусных турбоагрегатах на основе компьютерной модели // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – № 47. – С. 70-79. 3. *Степченко О.С., Красніков С.В., Торянік О.В.* Комп'ютерне моделювання багатокорпусного турбоагрегата у системі турбоагрегат – фундамент – основа // Машинознавство. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2009. – № 2 (140). – С. 27-33. 4. *Красніков С.В., Ларін О.О., Огороднік О.О.* Моделювання вібраційного стану пластинчато-стрижневої системи // Вісник НТУ «ХП». Тем. випуск «Динаміка і міцність машин». – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 42. – С. 77-81. 5. *Гринеv В.Б., Филиппов А.П.* Оптимизация элементов конструкций по механическим характеристикам. – К.: Наукова думка, 1975. – 542 с. 6. *Ізлін С.П.* Оптимізація форми елементів конструкцій. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – 240 с. 7. *Бабаков И.М.* Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 640 с.

Поступила в редколлегию 15.09.2010