

*А.С. СТЕПЧЕНКО*, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»;

*Е.Н. ДУДКИНА*, аспирантка, НТУ «ХПИ»;

*В.А. СОБОЛЬ*, студентка, НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВОГО РЯДА КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН: ЧАСТЬ 2. ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КЭ-МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.**

Розроблена структурна параметрична модель ЦНТ для суперелементного моделювання, яка представлена у вигляді діаграми класів UML, в якій виділені змінюванні характеристики структурних елементів. Проведено розрахунок динамічних характеристик для одного із класів ЦНТ.

There has been developed the structural parameter model of LPC for the superelement modeling. It is presented in the form of the UML class diagram. The variable characteristics of the structural elements have been marked out in the model. The dynamic characteristic for one of the LPC class is calculated.

Разработана структурная параметрическая модель ЦНТ для суперэлементного моделирования, представленная в виде диаграммы классов UML, в которой выделены изменяемые характеристики структурных элементов. Проведен расчет динамических характеристик для одного из классов ЦНТ.

**Введение.** Многоопорная роторная система паровых турбин представляет собой крупногабаритную конструкцию, которая должна обеспечить длительный срок эксплуатации при работе в условиях значительных динамических нагрузок. Особенно большое влияние на динамическую податливость опор ротора оказывает цилиндр низкого давления (ЦНД) турбины. С целью обеспечения заданного уровня вибраций для типового ряда ЦНД (турбины различной мощности), ранее [1] были рассмотрены, классифицированы и систематизированы типичные конструкции ЦНД. В результате были вычленены подобные структуры для конструкций типового ряда ЦНД, наследуемые в различных модификациях и отличающиеся пропорциями и отдельными структурными элементами. Разработанная в результате структурная схема типового ряда конструкций ЦНД позволяет построить параметрическую конечноэлементную модель для анализа динамических характеристик. Это позволит сформулировать критерии и проводить оптимизацию конструкции с целью обеспечения допустимого уровня вибрации опор ротора ЦНД.

**Постановка задачи.** На основе структурной схемы, разработанной ранее [1], построить суперэлементную параметрическую КЭ-модель типового ряда ЦНД. Так как ЦНД имеет две плоскости симметрии, то оценки динамических характеристик необходимо строить модель только для симметричной

$\frac{1}{4}$  части конструкции [3, 4]. Для оценки достоверности модели провести тестовые расчеты вибрационных характеристик для одного варианта корпуса ЦНД «стержневого» класса.

**Построение суперэлементной модели ЦНД.** В результате систематизации типового ряда ЦНД, проведенной в первой части работы [1], проведено разделение конструкций всего типового ряда наружного корпуса ЦНД на крышку (верхнюю половину) и корпус (нижнюю половину). Крышка представляет собой оболочечную конструкцию полумонокрилической формы. Корпус представляет собой прямоугольную пластинчато-стержневую сварную конструкцию. Корпус и крышка могут быть двух классов: «сотового» (ужесточение пластинами) и «стержневого» (ужесточение стержнями).

Однако и крышка и корпус ЦНД всегда состоят из секций, которые систематично повторяются во всех конструкциях. Особенностью этих секций есть то, что форма граничной части их не меняется, а внутренняя структура может отличаться. Данные секции целесообразно взять в качестве суперэлементов и из них набирать типовой ряд ЦНД.

**Суперэлементная модель корпуса.** В результате сравнительного анализа всего типового ряда ЦНД, выпускаемых ОАО «Турбоатом» предлагается следующее разбиение на суперэлементы конструкции корпуса ЦНД: секция выхлопа, секция подшипникового узла, секция диффузора и секция размещения обоймы. Суперэлементное разбиение на примере корпуса ЦНД «стержневого» класса приведено на рис. 1.

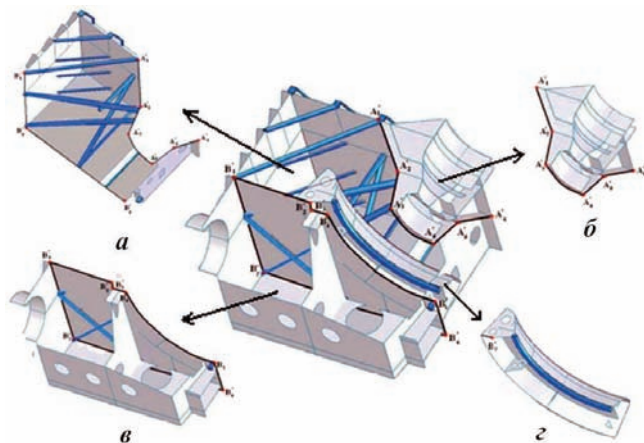


Рисунок 1 – Суперэлементная модель корпуса ЦНД:  
а – секция выхлопа, б – секция подшипникового узла, в – секция размещения обоймы, г – секция диффузора.

Внутренняя структура секции выхлопа принципиально отличается для двух классов: в «стержневых» в качестве ужесточающих элементов используются стержни, а в «сотовых» – пластины. Также отличительной особенностью секции выхлопа для «стержневых» и «сотовых» корпусов являются форма и количество ужесточающих коробок на торцевых стенках наружного корпуса.

Внутренняя структура секции размещения обоймы определяется подводом пара в ЦНД. Существует два способа подвода пара: боковой и нижний. Турбины, которые проектируются для работы на АЭС имеют нижний подвод пара, таковы требованиями биологической защиты и компоновки турбоустановки: все паропроводы должны быть убраны из машинного зала в связи с радиоактивностью пара. Для турбин ТЭС применяют боковой подвод пара.

Секция диффузора имеет нескольких вариантов конструкции внутренней структуры: торовые листы размещают на направляющих листах, на ребрах, либо используют диффузор в виде «бублика». При проектировании корпусов ЦНД для различных турбоагрегатов возможно использование любого из вышеперечисленного диффузора. Применение того или иного варианта зависит от длины лопатки 5 ступени, выбора системы охлаждения выхлопного патрубка, а также от выбранной схемы влагоудаления.

Конструкция подшипникового узла зависит от класса корпуса. В «сотовых» конструкциях используют подшипник «простой конический», а в «стержневых» - «составной конический». Диаметр самого подшипника зависит от массы ротора.

Все вышеперечисленные отличия определяют также различие в варьируемых параметрах для каждого суперэлемента в зависимости от вида.

**Суперэлементная модель крышки.** На основании систематизации типового ряда крышек ЦНД, выпускаемых ОАО «Турбоатом» [1], предлагается следующее разбиение на секции конструкции крышки ЦНД: секция выхлопа, секция подшипникового узла, секция диффузора и секция размещения обоймы. Суперэлементное разбиение для крышки ЦНД «стержневого» класса приведено на рис. 2.

Секция размещения обоймы различается количеством ужесточающих элементов – косынок.

Внутренняя структура секции выхлопа не имеет принципиального отличия для двух классов и определяется количеством, формой ужесточающих элементов (коробка и стержни).

Секция диффузора не зависит от класса корпуса, а является симметричной частью секции диффузора корпуса и определяется такими же параметрами как и одноименная секция, описанная выше.

Секция подшипникового узла крышки определяется классом ЦНД и в зависимости от класса крышки используют «простой конический» в «сотовых» конструкциях или «составной конический» в «стержневых».

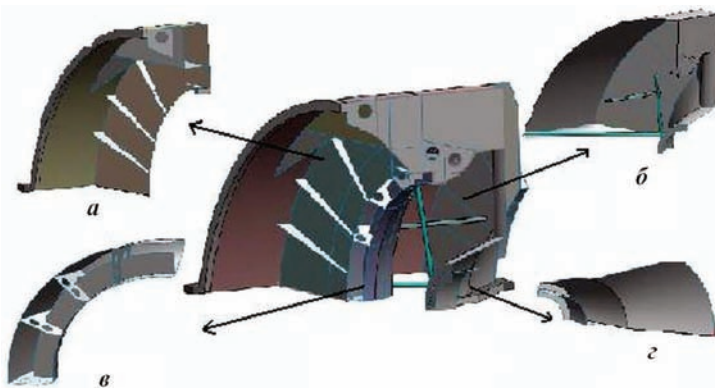


Рисунок 2 – Суперэлементная модель крышки:  
*a* – секция размещения обоймы, *б* – секция выхлопа, *в* – секция диффузора, *г* – секция подшипникового узла

**Разработка параметрической модели ЦНД.** В рамках теории систем автоматического проектирования, для оптимизации параметрических моделей сложных объектов и систем, обычно применяется язык унифицированного моделирования UML [5]. UML – это графический язык, соответственно которому моделирование описывается в виде определенного набора диаграмм (наиболее распространенные из которых – классы, объекты, пакеты, деятельности, взаимодействия, последовательности и развертывание). Он используется для структурного моделирования: структурная часть это унифицированное представление в предметной области в виде декомпозиции сложной системы на классы объектов. Данный язык и был использован для описания параметрической суперэлементной модели ЦНД.

На рис. 3 и 4 приведены диаграммы классов, которые представляют декомпозицию параметрической геометрической модели ЦНД на структурные единицы: секцию подшипникового узла, секцию выхлопа, секцию размещения обоймы и секцию диффузора. Приведенные параметры каждой из этих секций. Такое представление дает возможность разделить параметры, которые принадлежат к разным суперэлементам и выделить параметры, которые являются общими для различных классов ЦНД.

Таким образом, для построения параметрической модели ЦНД нужно, задав необходимые параметры, построить модели отдельных суперэлементов, а потом провести процедуру их объединения.

Используя приведенную выше методологию, была разработана параметрическая КЭ-модель корпуса «стержневого» класса ЦНД турбины К-320-23,5 [6]. Полученная параметрическая КЭ-модель построена с управляемой регулярной сеткой. Модели корпуса ЦНД с разной густотой сетки приведены на рис. 5. Поскольку построена модель симметричной части, то на соответствующие плоскости наложены граничные условия симметрии.

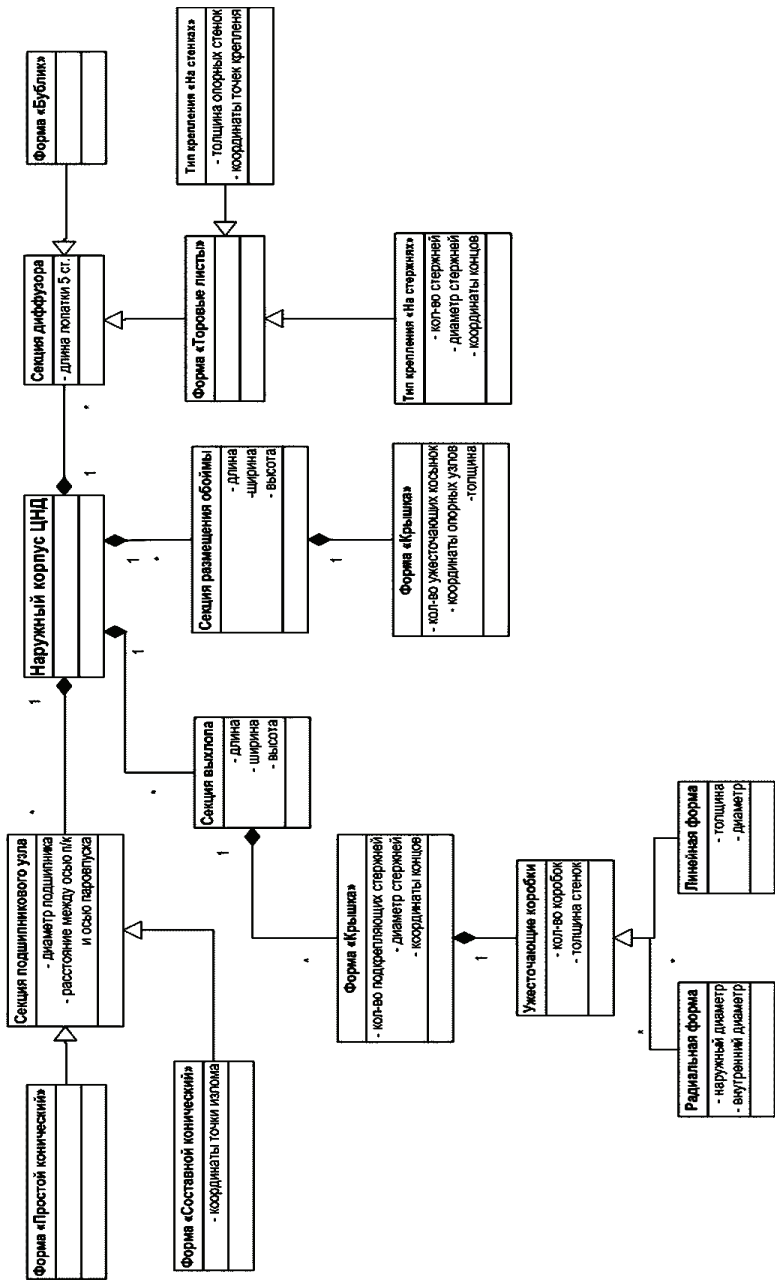


Рисунок 3 – Структура параметров для модели верхней половины корпуса ЦНД, которая представлена в виде диаграммы классов UML.



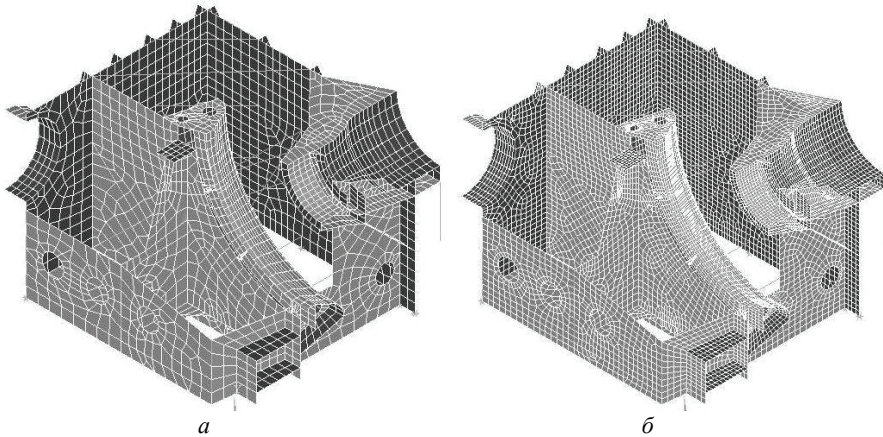


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель корпуса ЦНД:  
*a* – грубая сетка, *б* – мелкая сетка

Как видно из рис. 5 расчетная модель корпуса ЦНД представляет собой оболочечно-пластинчато-стержневую систему. В КЭ-моделях использовались пространственный двух узловой стержневой КЭ и четырех узловой оболочечный КЭ с шестью степенями свободы в узле.

Построенная параметрическая модель позволяет варьировать параметрами пластин и стержней, геометрическими размерами.

**Анализ собственных частот и форм ЦНД.** Предварительное статическое НДС может оказывать влияние на динамические характеристики корпуса ЦНД. Оно определяется действием давления от вакуума внутри корпуса ЦНД и веса присоединенных к нему частей ЦНД (конденсатор, обойма, ротор). Присоединенные части учтены в модели как сосредоточенные массы, данный способ учета показал достаточно точные результаты при расчете вибраций ЦНД [3.4]. Поэтому предварительно была решена задача статического деформирования корпуса ЦНД действию силы тяжести и давления от вакуума.

Разрешающая система уравнений для определения статических перемещений в КЭ-постановке имеет вид:

$$[K_0] \cdot \xi = g \cdot \text{diag}([M_0]) + F, \quad (1)$$

где  $[K_0]$ ,  $[M_0]$  – матрицы жесткости и масс корпуса ЦНД;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\xi$  – вектор перемещений,  $F$  – давление от вакуума внутри корпуса.

Наличие предварительного НДС приводит в рамках КЭ-постановки к появлению дополнительной составляющей в матрице жесткости конструкции при записи уравнения форм колебаний:

$$([K_0] + [\bar{K}(\sigma_0)] - p^2 \cdot [M_0]) \cdot \lambda = 0, \quad (2)$$

где  $[K]$  – матрица добавочной жесткости (которая определяется предварительным статическим напряженным состоянием),  $\sigma_0$  – вектор предварительных статических напряжений в конструкции;  $p$  – собственная частота,  $\lambda$  – вектор собственных форм.

Собственные частоты моделей ЦНД

№	Частоты, Гц			
	Модель с грубой КЭ-сеткой		Модель с мелкой КЭ-сеткой	
	без учета НДС	с учетом НДС	без учета НДС	с учетом НДС
1	14,697	14,697	14,778	14,778
2	27,009	27,011	27,348	27,348
3	30,324	30,325	29,731	29,731
4	38,923	38,923	38,862	38,862
5	39,106	39,106	39,061	39,061
6	39,673	39,674	39,170	39,170
7	47,374	47,373	46,780	46,780
8	60,415	60,491	59,790	59,793

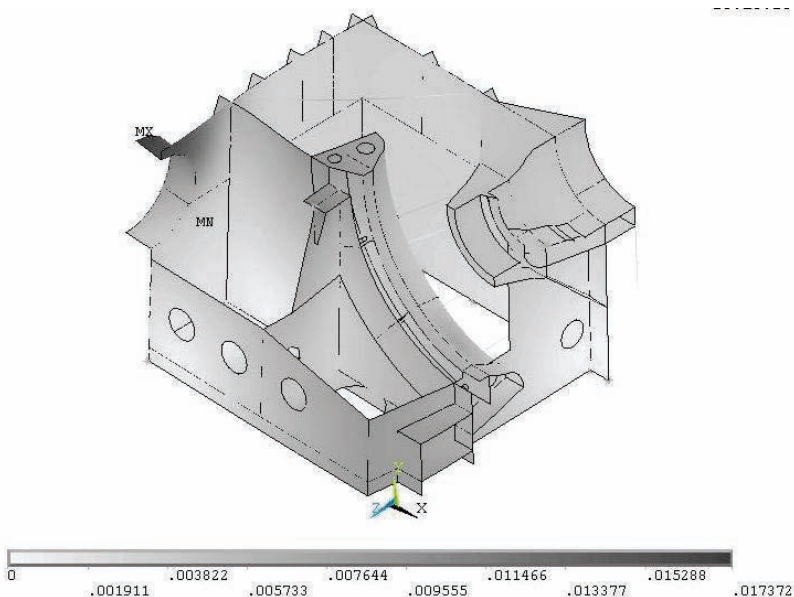


Рисунок 6 – Собственная форма ЦНД на частоте 47,373 Гц

На основе построенной конечно-элементной модели были проведены тестовые расчеты собственных частот ЦНД, величины которых приведены в таблице. Как видно из таблицы величины собственных частот практически не



меняются при учете НДС и изменении густоты КЭ-сетки. 1-я, 7-я, 8-я собственные частоты соответствуют глобальным резонансам ЦНД, остальные частоты соответствуют локальным резонансам отдельных пластин и стержней корпуса ЦНД. Наиболее опасной является 7-я собственная частота, которая близка к рабочей частоте вращения ротора 50 Гц. Ее собственная форма приведена на рис. 6.

### **Выводы**

- 1) Разработана параметрическая геометрическая и КЭ-модель типового ряда ЦНД;
- 2) Проведен расчет и анализ динамических характеристик типового ряда ЦНД;
- 3) Показано незначительное влияние предварительного НДС на собственные частоты корпуса ЦНД.

**Список литературы:** 1. Дудкина Е.Н., Степченко А.С. Моделирование типового ряда конструкций корпусов цилиндра низкого давления мощных паровых турбин: Часть I. Классификация и разработка структурной схемы // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХП». – 2009. – № 42. – С. 147-154. 2. Степченко А.С., Дудкина Е.Н. Оптимизация структуры корпуса турбоагрегата по динамическим характеристикам на основе параметрической модели // Міцність матеріалів та елементів конструкцій: Тези допов. Міжнародної наук.-техн. конф. – К.: ІПМ ім. Г.С. Писаренка НАН України. – 2010. – Т. 2. – С. 113-114. 3. Степченко О., Красніков С., Торянік О. Комп'ютерне моделювання багатокорпусного турбоагрегата у системі турбоагрегат-фундамент-основа // Машинознавство. – Львів: «КІНПАТРІ ЛТД», 2009. – № 2 (140). – С. 27-33. 4. Степченко А.С. Алгоритм структурной оптимизации системы турбоагрегат-фундамент по спектральным характеристикам // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХП». – 2010. – № 37. – С. 145-153. 5. Фаулер М., Скотт К. UML в кратком изложении. Применение стандартного языка объектного моделирования. – М.: Мир, 1999. 6. Дудкина Е.Н., Степченко А.С. Экспериментальные исследования причин опасных вибраций корпуса ЦНД турбины К-320-23,5 // Матеріали ХІ МНПК «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (9 грудня 2011 р., м. Харків, УЦЗУ). – 2011. – С. 36-37.

*Поступила в редколлегию 05.10.2011*