

**В.А.ЖОВДАК**, докт.техн.наук; **А.С.СТЕПЧЕНКО**, канд.техн.наук;  
**А.В.ТОРЯНИК**; **С.В.КРАСНИКОВ**, канд.техн.наук;  
НТУ «ХПИ», Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РАССТРОЙКИ В МНОГОКОРПУСНЫХ ТУРБОАГРЕГАТАХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ**

У даній статті приводиться аналіз динаміки багатокорпусних турбоагрегатів на прикладі комп'ютерної кінцево-елементної моделі системи турбоагрегат-фундамент-основа К500. На основі порівняльного аналізу власних форм коливань окремого корпусу ЦНД і системи ТФО в цілому, досліджується явище розладу, що властиве багатокорпусним турбоагрегатам. Запропоновано рекомендації урахування розладу при проектуванні нових і модернізації існуючих турбоагрегатів.

This article provides an analysis of the dynamics of multi-body turbo sets on the example of computer finite-element model of turbine unit-foundation-base (UFB) K500. Based on natural modes comparative analysis of a cylinder of low pressure (CLP) separate body and entire UFB system, the mistuning investigation related to multi-body turbine is performed. Recommendations for detuning consideration have been proposed for the cases of designing new and upgrading existing turbo sets.

**1 Введение. Актуальность проблемы.** Поскольку атомные электростанции по-прежнему являются основным источником электроэнергии на Украине и в мире в целом, проблемы, связанные с их проектированием, эксплуатацией или модернизацией являются крайне актуальными. Как известно, максимальной мощностью и эффективностью обладают многокорпусные турбоагрегаты сложной конструкции. Данная работа посвящена исследованию вибрационных процессов, протекающих в агрегатах подобного рода.

В качестве объекта исследования в данной работе выступает система турбоагрегат - фундамент для турбины мощностью 500 Мвт – К500. Она состоит из железобетонного фундамента длиной более 60 метров, турбины, генератора, возбuditеля генератора. Особенностью конструкции турбины является наличие пяти корпусов, из которых четыре корпуса цилиндров низкого давления (ЦНД) и один корпус цилиндра высокого давления (ЦВД). ЦНД представляют собой одинаковые коробчатые металлические конструкции (габариты 8 x 9 x 6 метров) и состоят из пластин, оболочек, стержней и труб. В всех четырех корпусах ЦНД встроены опоры роторов, они наиболее податливы и требуют детального моделирования. ЦВД представляет собой твердую металлическую конструкцию, по форме близкую к цилиндрической, довольно жесткую, которая при работе турбины колеблется как единое целое и может моделироваться как система сосредоточенных масс. Все корпуса турбины и генератор соединены единым валопроводом.

**2 Постановка задачи.** Фундамент многокорпусного турбоагрегата К500, изображенный на рис. 1, имеет продольную плоскость симметрии. Однако в поперечном направлении фундамент несимметричен. Особенностью много-

корпусных турбоагрегатов подобного типа является расположение корпусов вдоль конструкции фундамента, что приводит к различной жесткости опирания. Наличие симметрично расположенных идентичных корпусов с несимметричными жесткостями закрепления требует детального исследования, поскольку заведомо предполагает густой спектр частот.

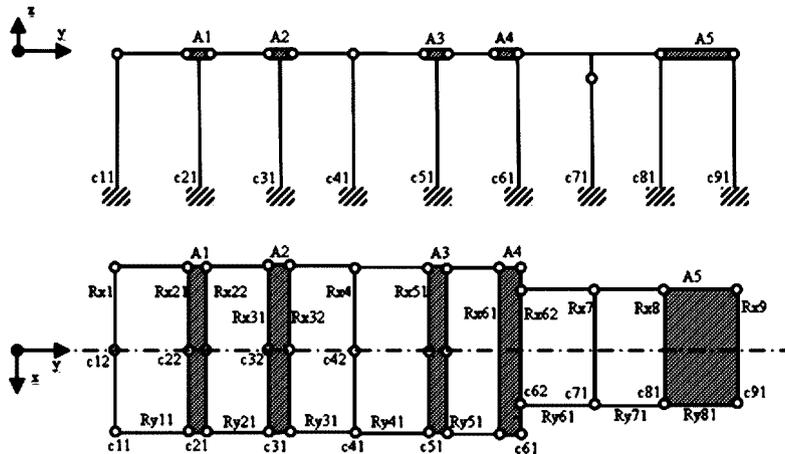


Рисунок 1 – Схема модели фундамента турбины К-500

Для проведения исследований был использован метод конечных элементов, хорошо зарекомендовавший себя при решении задач статики и динамики для конструкций со сложной геометрией, таких как система турбоагрегат-фундамент. Была построена конечно-элементная модель системы ТФО с подробным моделированием наиболее чувствительных к вибрациям корпусных конструкций турбины. Эти конструкции моделировались с помощью оболочечных, стержневых и массовых конечных элементов.

Фундамент системы моделировался на основании пластинчато-стержневой модели, результаты исследования которой были проведены ранее [1].

Корпус ЦВД турбины, валопровод, генератор и возбудитель генератора моделировались в виде системы масс. Заполненный водой конденсатор ЦНД моделировался с помощью кинематических ограничений и системы масс.

Корпус ЦНД, состоящий из корпусной части и крышки, моделировался детально. Геометрия нижней корпусной части и крышки приведена на рис. 2. Передаваемая на ЦНД масса конденсатора, обоймы и ротора учтены как сосредоточенные массы. Построенная конечно-элементная модель конструкции ЦНД в сборе представлена на рис. 3.

Поскольку остальные компоненты системы либо имеют очень высокую жесткость (ЦВД, возбудитель генератора), либо их жесткость не влияет на колебания ЦНД, они были смоделированы сосредоточенными массами в местах опирания на фундамент [2,3]. Система турбоагрегат-фундамент для турбины

К-500 имеет одну плоскость симметрии, поэтому для исследования колебаний смоделирована симметричная часть системы [2] с учетом граничных условий симметрии. Иллюстрация конечно-элементной модели системы ТФО К500 представлена на рис. 4. Выбранная схема моделирования системы ТФО имеет высокую степень адекватности и была апробирована в предыдущих исследованиях для однокорпусных турбоагрегатов [4].

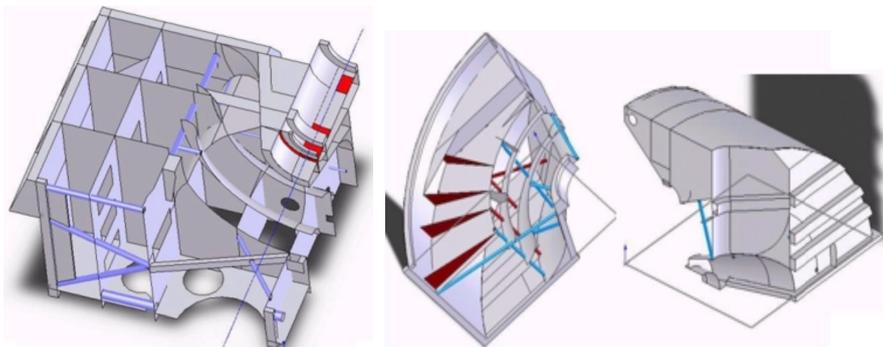


Рисунок 2 – Нижняя часть корпуса турбины К-500, 1/4

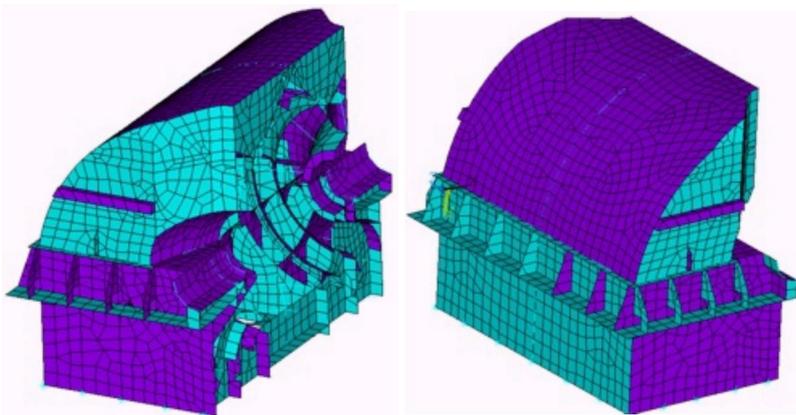


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель симметричной половины корпуса ЦНД турбины К-500 в сборе

**3 Исследование динамических характеристик многокорпусного турбоагрегата.** Вначале было проведено исследование колебаний одного ЦНД на основе модели симметричной половины корпуса в сборе (рис. 3), при этом крепление корпуса на фундамент было взято как жесткое. В результате расчета были получены собственные частоты, приведенные в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что ЦНД имеет достаточно густой спектр собственных частот в диапазоне до 50Гц. Часть из них кратные, так как половина ЦНД имеет плоскость симметрии. Анализ собственных форм колебаний показал, что

наиболее опасными являются формы с максимальными амплитудами у пластины продольного ребра и пластины в поперечной плоскости крышки корпуса. Данные формы приведены на рис. 5.

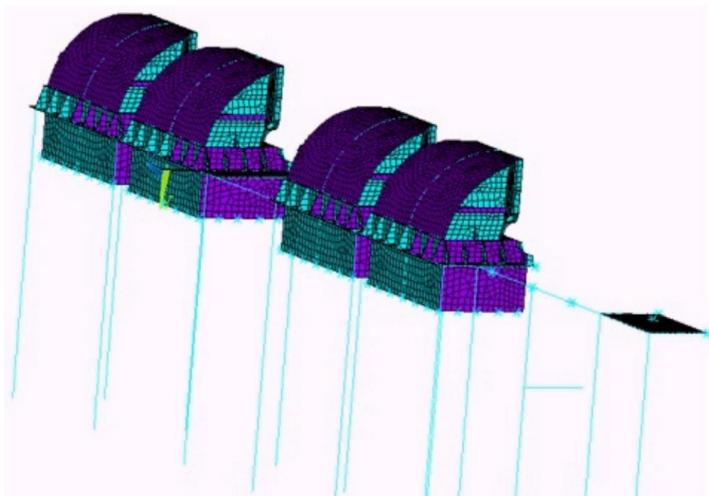


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель симметричной половины системы ТФО К-500, конечно-элементная модель системы в целом

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний корпуса турбины К500

| № | Собственные частоты (Гц) | №  | Собственные частоты (Гц) |
|---|--------------------------|----|--------------------------|
| 1 | 13,763                   | 10 | 40,796                   |
| 2 | 17,055                   | 11 | 42,112                   |
| 3 | 19,062                   | 12 | 44,25                    |
| 4 | 31,017                   | 13 | 44,286                   |
| 5 | 31,036                   | 14 | 45,935                   |
| 6 | 33,36                    | 15 | 48,935                   |
| 7 | 36,522                   | 16 | 51,994                   |
| 8 | 37,883                   | 17 | 54,597                   |
| 9 | 37,899                   |    |                          |

Для построенной модели системы ТФО (рис. 4) были проведены численные исследования собственных частот и форм колебаний с детализацией в районе рабочей частоты.

Расчет модели системы ТФО на собственные частоты дал густой спектр частот в диапазоне 0-55 Гц. Собственные частоты в районе рабочей частоты 50 Гц приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, данной конструкции присуще наличие собственных частот, сгруппированных относительно определенного значения. Анализ собственных форм соответствующих этим частотам, представленных на рис. 6, 7, 8, 9, показал, что эти собственные формы представля-

ют собой следствие реализации одной из собственных форм корпуса, приведенных ранее на рис. 5.

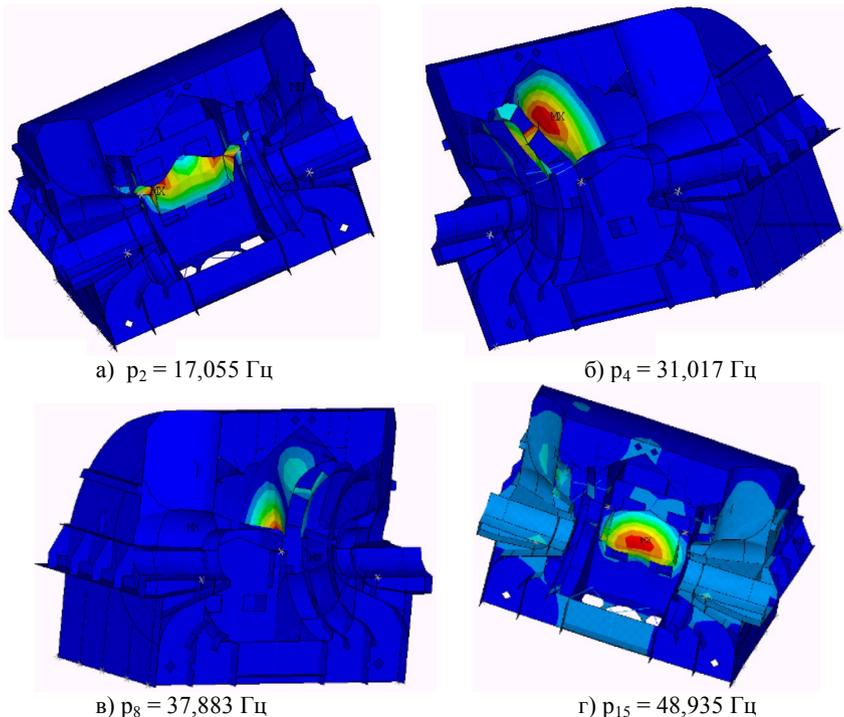


Рисунок 5 – Характерные собственные формы колебаний корпуса турбины K500

Анализ собственных форм колебаний на частотах  $p_{90} = 45,706 \text{ Гц}$ ,  $p_{91} = 46,067 \text{ Гц}$ ,  $p_{92} = 46,388 \text{ Гц}$ ,  $p_{93} = 47,314 \text{ Гц}$  показал, что проявляется одна и та же форма колебаний в разных корпусах ЦНД. Эта форма соответствует собственной форме колебаний  $p_{15}$  корпуса ЦНД, изображенной на рис. 5, г. Условно нумеруя ЦНД слева направо, данная форма реализуется в следующем виде – табл. 3.

Таблица 2 – Собственные частоты колебаний системы ТФО

| №  | Собственные частоты (Гц) | №   | Собственные частоты (Гц) |
|----|--------------------------|-----|--------------------------|
| 89 | 45,552                   | 97  | 49,21                    |
| 90 | 45,706                   | 98  | 49,434                   |
| 91 | 46,067                   | 99  | 50,235                   |
| 92 | 46,388                   | 100 | 50,951                   |
| 93 | 47,314                   | 101 | 51,156                   |
| 94 | 47,765                   | 102 | 51,515                   |
| 95 | 48,493                   | 103 | 51,769                   |
| 96 | 49,03                    |     |                          |

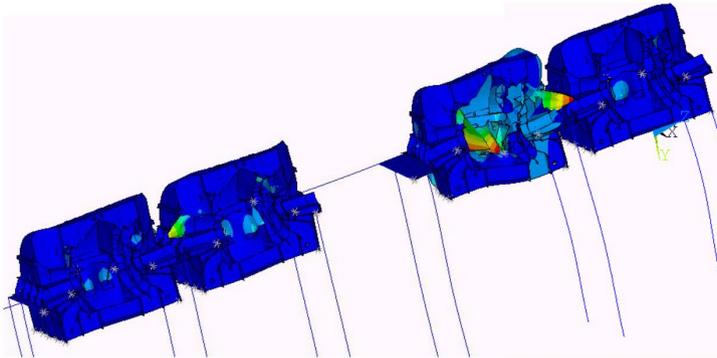


Рисунок 6 – Группа собственных форм колебаний системы ТФО в области 45-47 Гц –  $p_{90} = 45,706$  Гц

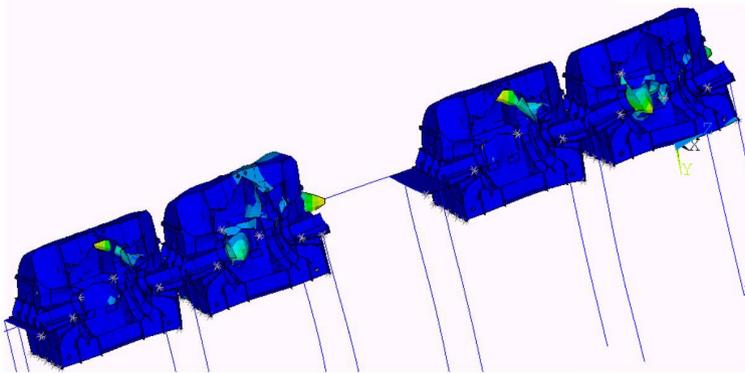


Рисунок 7 – Группа собственных форм колебаний системы ТФО в области 45-47 Гц –  $p_{91} = 46,067$  Гц

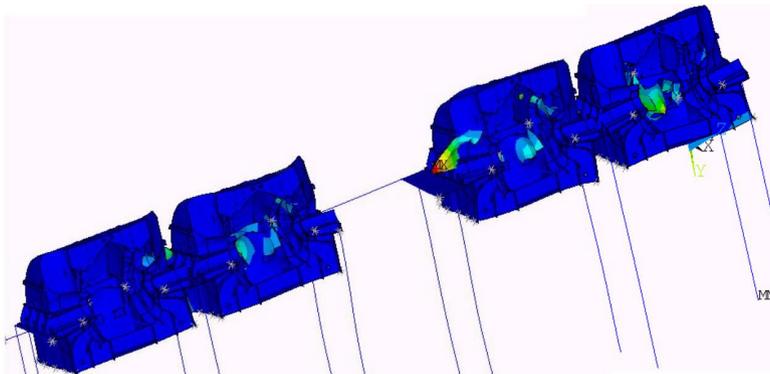


Рисунок 8 – Группа собственных форм колебаний системы ТФО в области 45-47 Гц –  $p_{92} = 46,388$  Гц

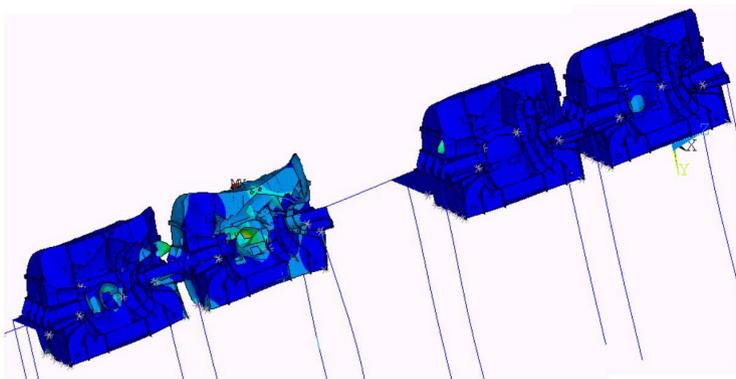


Рисунок 9 – Группа собственных форм колебаний системы ТФО в области 45-47 Гц –  $p_{93} = 47,314$  Гц

Таблица 3 – Реализация собственной формы  $p_{15}$  колебаний корпуса в различных ЦНД на близких собственных частотах колебаний системы ТФО

| № ЦНД | Реализация собственной формы колебаний $p_{15}$ корпуса ЦНД на собственных частотах системы ТФО |                      |                      |                      |
|-------|---|----------------------|----------------------|----------------------|
|       | $p_{90} = 45,706$ Гц  | $p_{91} = 46,067$ Гц | $p_{92} = 46,388$ Гц | $p_{93} = 47,314$ Гц |
| 1     | +   |                      |                      | +                    |
| 2     | +   | +                    | +                    | +                    |
| 3     | +   |                      | +                    |                      |
| 4     | +   | +                    | +                    | +                    |

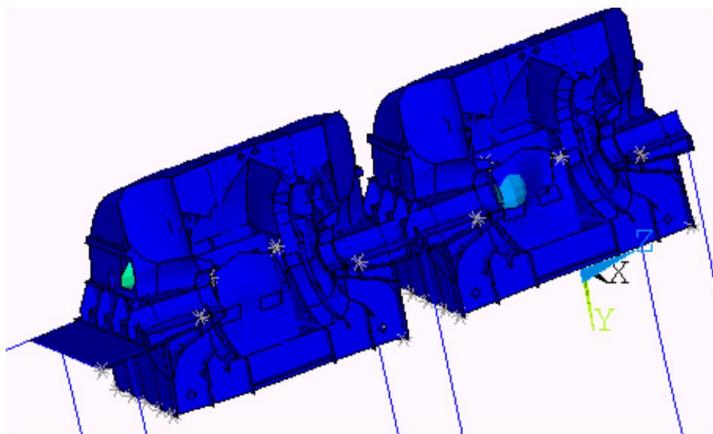
Из анализа собственных форм видно, что собственные формы колебаний системы делятся на группы, в каждой из которых реализуется одна и та же собственная форма корпуса ЦНД для одного или нескольких корпусов, то есть наблюдается расстройка. Это приводит к тому, что на разных собственных частотах колебания системы ТФО проявляется одна и та же форма колебаний корпуса ЦНД. Более того, из-за наличия локальных резонансов элементов фундамента, одна и та же форма колебаний корпуса может проявляться в разных частотных диапазонах, как проиллюстрировано на рис. 10.

Это явление объясняется тем, что несмотря на сходные условия закрепления 4 корпусов, жесткость фундамента для каждого из них различна. Таким образом, можно говорить о явлении расстройки собственных частот для многокорпусных агрегатов.

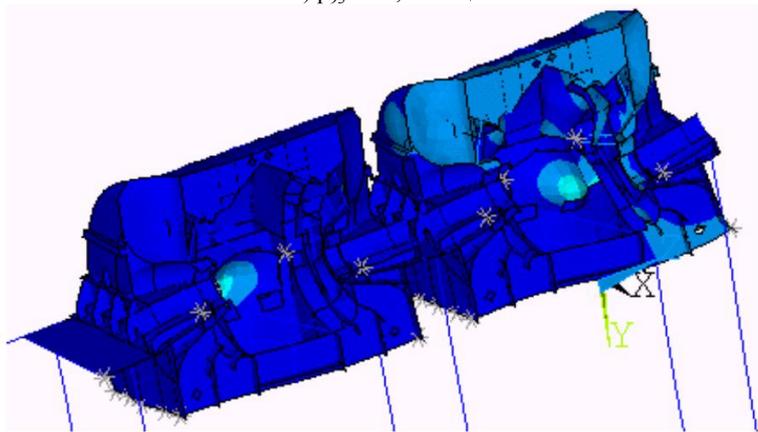
Кроме того, из-за близости собственных частот корпуса ЦНД ( $p_{7,8,9}$  и  $p_{12,13,14}$ , см табл 1), для данной конструкций явление расстройки приводит к одновременной реализации разных собственных форм колебаний корпуса на одной собственной частоте системы ТФО. Данное явление реализуется, к примеру, в 3м корпусе на частоте  $p_{92} = 46,388$  Гц (рис. 8) и соответствует формам корпуса ЦНД  $p_4$  и  $p_{15}$ , проиллюстрированных на рисунках рис. 5, б и рис. 5, г.

Анализ собственных частот и форм колебаний показа, что при максимуме

амплитуд по одной форме для одного корпуса ЦНД, колебания с аналогичной формой наблюдаются и на соседних ЦНД, только с меньшей амплитудой. Данное явление может привести к увеличению ширины резонансного пика определяемого расстроенной собственной частотой, и соответственно уровню вибраций всех ЦНД системы.



а)  $\rho_{93} = 47,314 \text{ Гц}$



б) 52.339 Гц

Рисунок 10 – Реализация одной и той же формы колебаний стенки корпуса на разных собственных частотах – 47 и 52 Гц

Следует отметить, что явление расстройки присуще всем многокорпусным турбоагрегатам и является их важной особенностью, которую следует учитывать при проектировании новых и модернизации существующих турбоагрегатов. Попадание одной из опасных собственных частот колебаний корпуса в рабочую область турбины приводит к тому, что отстройка от резонанса

представляет собой серьезную проблему:

- 1 требуется сдвиг собственных частот на величину, превышающую диапазон, в который попадает группа расстроенных частот;
- 2 плотность резонансных частот увеличивается пропорционально коэффициенту, соответствующему количеству корпусов, следовательно, отстройка от резонанса усложняется, так как сдвиг из одной резонансной области расстройки может привести к попаданию в другую резонансную область.

### **Выводы**

Таким образом, исследование вибрационных характеристик многокорпусных турбоагрегатов показало наличие расстройки собственных частот колебаний ЦНД в системе ТФО. Данное явление присуще многокорпусным турбоагрегатам по причине невозможности создания абсолютно одинаковых по жесткости условий опирания корпусов.

Можно выделить следующие рекомендации учета расстройки при проектировании многокорпусных турбоагрегатов:

- 1 для отстройки от резонансов в рабочем диапазоне требуется смещение собственных частот на величину, значительно превышающую подобное значение при отстройке от резонансов у однокорпусных турбоагрегатов;
- 2 при оптимизации системы относительно резонансов следует учитывать опасность группы резонансов на каждом из диапазонов расстройки, так как густой спектр частот может не позволить отстроиться от резонанса полностью, но может иметь место возможность отстроиться на менее опасный резонанс;
- 3 явление расстройки в отдельных случаях приводит к взаимному наложению разных собственных форм ЦНД на одной собственной частоте системы ТФО.

**Список литературы:** 1. *Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С., Торьяник А.В.* Моделирование фундамента для многокорпусного турбоагрегата. // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Динамика и прочность машин. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – № 36. – С. 81-88. 2. *Степченко А.С.* Численные исследования динамических характеристик системы турбоагрегат-фундамент // Дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Харьк. Гос. политех. ун-тет. – 1994. – 194 с. 3. *Красников С.В.* Колебания и надежность системы турбоагрегат-фундамент-основание с учетом случайности параметров // Дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – НТУ «ХПИ». – 2003. – 140 с. 4. *Жовдак В.А., Красников С.В., Степченко А.С.* Исследование динамического взаимодействия турбоагрегата К-325-23.5 с фундаментом // Вестник ХГПУ. Вып. 53. Динамика и прочность машин. – Харьков, ХГПУ, 1999. – С.64-69.

*Поступила в редакцию 13.11.2008*