

# МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТЕРОВ ТУРБОМАШИН.

©2012 Антипов В.А., Андриянов С.В., Сазонова В.А.

Федеральное бюджетное образовательное государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Самарский государственный университет путей сообщения», Самара

Results theoretical and experimental researches of influence of power{force} factors on frequency characteristics of the rotor rotating with the big speed are resulted. Importance of the account of this influence is shown at the decision of dynamic problems{tasks}.

Ротор современного турбокомпрессора представляет собой сложную динамическую систему, подверженную воздействию интенсивной вибрационной нагрузки различного типа и, одновременно, сам является источником интенсивной вибрации. Традиционный подход к подавлению вибрации высокооборотных роторов заключается в введении демпфирования в опорах. Однако этот метод имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что в следствии необходимости увеличения зазора в опорах. Возрастают утечки рабочей среды, что в конечном счете приводит к снижению эффективности турбомашин. В работах [1, 2, 3] предложены иные методы снижения вибронегативности высокоскоростных роторов турбомашин. Среди этих методов наиболее всеобъемлющий подход, изложенный в [3]. Сущность указанного метода регулирования вибрационных характеристик системы ротор - опора заключается в изменении физических параметров объекта путем нагружения его дополнительными силовыми факторами, направления воздействия которых не совпадают с регулируемой вибрацией. Техническим результатом, на достижение которого направлен этот метод, является существенное расширение области применения метода по факторам расширения контингента прикладываемых силовых факторов и расширение собственно количества объектов, к которым эти факторы прикладывают, а также расширение количества управляемых характеристик объектов.

Область применения метода значительно расширена за счет того, что во-первых, рассматривается какой-то конкретный силовой фактор, например, продольные усилия или наддув ротора, а комплекс силовых факторов, имеющих общую характеристику: их направление воздействие отлично от направления регулируемой вибрации. Во-вторых, рассматривается не конкретная задача, например, прохождение ротором резонансной зоны, и не конкретный многослойный элемент системы сосредоточенным демпфированием, а регулирование вибрационных характеристик системы объект-опоры вообще. И, наконец, в-третьих, как показали наши исследования, речь идет о расширении спектра воздействия указанным способом на вибрационные характеристики, т.е., регулируют ширину зон неустойчивости, собственно количество суб- и суперрезонансов, перераспределяют энергию между резонансами и т.п. При этом положительные эффекты методов [1,2] являются частными случаями проявления этой зависимости.

Конструктивное исполнение ротора современной турбомашин предусматривает разгрузку от осевых сил. Можно, например, путем изменения величины этого усилия изменить вибрационные характеристики объекта ротор-опоры. Другое техническое решение: можно изменить, например, величину передаваемого крутящего момента путем изменения количества ступеней турбины или компрессора, изменить форму газоздушного тракта и т.п.

Решения могут быть разнообразными. Исключительной важностью при этом является то, что ранее влияние этих факторов на вибрационные характеристики объекта не учитывались, а зная суть способа, мы можем целенаправленно его использовать для измерений вибрационных характеристик объекта и, тем самым, повысить надежность и ресурс энергетической установки, достичь требуемого уровня вибрации при доводке двигателя, исключить использование на практике двигателей с повышенной вибрацией, улучшить эксплуатационную экологию.

Разработана и апробирована математическая модель, реализующая расчет на исследование влияния некоторых факторов на динамические характеристики ротора. Для решения задачи применен метод конечных элементов. Алгоритм метода использует математическую модель колебаний упругого тела без учета демпфирования и сопротивления движению, которая может быть определена в форме динамической задачи с помощью матричного дифференцированного уравнения:

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{u\} + [k] \cdot \{u\} = \{F\},$$

Где [M]- матрица масс системы;

[K]- матрица жесткости;

{u} - вектор перемещений узлов конечных элементов;

{F} - вектор узловых нагрузок.

Матрицы [M], [K] и векторы {u} и {F} при этом построены с учетом действия продольных нагрузок и гироскопического эффекта.

С целью проверки достоверности разработанной модели были выполнены экспериментальные исследования. Сравнительный анализ расчетных исследований и результатов экспериментов позволил сделать следующие выводы:

-экспериментальные исследования подтвердили достоверность расчетной модели. Имеющиеся расхождения в пределах точности инженерных расчетов;

- результаты исследований дают возможность предложить влияние на собственную частоты не только изгибной жесткости ротора, но и жесткости ротора в

меридиальном и осевом направлениях, что имеет место для круговых цилиндрических оболочек и толстенных цилиндров;

- влияние наддува на изменение собственной частоты ротора (1-й тон) существенное( в зависимости от давления поддува от 0 до 8 %);

- при наддуве наблюдается качественное изменение АЧХ ротора. С увеличением внутреннего давления изменялись добротность колебательной системы. Колебания затухали медленнее, уменьшалась доля высоких частот в общем спектре. При этом амплитуда низшей формы колебаний несколько увеличилась, что позволяет предложить перераспределение энергии спектра в сторону увеличения энергии основного тока колебаний.

Таким образом, при наддуве возрастает «организованность» колебательной системы, что является положительным фактором, так как уменьшается вероятность возникновения резонанса в области высших частот, больших критической.

Кроме того, результаты исследований дают обоснование применение для подавления вибрации разработанного автором метода [4]; заключающегося в ступенчатом изменении жесткости ротора при его прохождении резонансной зоны путем введения и стравливания давления поддува. Это позволяет избежать для «гибких» роторов даже кратковременной работы в резонансной зоне и исключает необходимости применения сосредоточенного демпфирования в опорах ротора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1632122 А1 SU, МПК F16F 15/16. Способ подавления радиальной вибрации роторов турбомашин / В.А. Антипов, О.В. Фомин, П.П. Власов. – ДСП. 1988г.
2. А.с. 589483, СССР, М. кл. F16F 15/16. Способ регулирования демпфирующих свойств многослойных элементов/ И.Д. Эскин. Ю.К. Пономарев.

В.А. Безводин, В.А. Антипов. –  
Опубл.25.01.78., бюлл. №3  
Патент АФ № 2267668, МПК F16F  
15/00. Способ регулирования  
вибрационных характеристик системы

объект- опора/ В.А. Антипов, Ю.К.  
Пономарев, А.В. Ковтунов, В.А. Дулецкий,  
П.В. Вершинин. Заявитель  
патентообладатель : СамГУПС.- опубл.  
10.01.2006, бюлл. №1

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С ВИХРЕВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

©2012 Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я., Зубин М.А., Зубков А.Ф.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

## CALCULATION-EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW AROUND BODIES WITH VORTEX CELLS

©2012 Andronov P.R., Guvernuyuk S.V., Dynnikova G. Ya., Zubin M.A., Zubkov A.F.

Vortex cell is a certain artificial impression (cavity) on a smooth surface, for example, an aerofoil. If a viscous flow smoothly wraps the surface in front and behind the cell so no flow separation occurs, such cell is defined as a working vortex cell. Intensive flow recirculation that inevitably occurs in a working vortex cell is referred to as trapped vortex. It is possible to say that a working vortex cell is a cell with a started trapped vortex. The main goal of installing vortex cells on a surface is to avoid the boundary-layer separation. The boundary layer has a tendency to separate in the areas of the surface that experience an increase in pressure, or, in other words, where adverse pressure gradient exists. Therefore, the major practical quality of the vortex cell should be its ability to remain "working" under the largest possible adverse pressure gradient. Efficiency of several methods for influencing the flow in the vortex cell was investigated. These methods are: deterministic suction with constant suction flow rate; periodic suction with feedback control based on pressure data; periodic suction from the center of the cell; periodic impulse supply.

Управление обтеканием с помощью организованного отрыва потока позволяет в ряде случаев существенно улучшить аэродинамические характеристики тел. Создание на обтекаемой поверхности ловушек интенсивных вихрей в виде каверн, называемых вихревыми ячейками [1], может локализовать зоны отрыва потока и обеспечить плавное обтекание. "Улавливание вихря" – это технология предотвращения нестационарного схода крупных вихрей с диффузорных участков поверхности тела (крылового профиля или расширяющегося канала, рис.1). «Диффузорным» участком поверхности тела называют часть его контура, вдоль которой происходит торможение потока под действием положительного градиента давления. При безотрывном обтекании любого замкнутого контура неизбежно существование на нем диффузорных участков [1]. Диффузорными

являются также стенки любого расширяющегося канала, ограничивающего дозвуковой поток среды.

Идея применения вихревых ячеек для предотвращения отрыва на толстом крыле была впервые выдвинута и практически опробована Л.Н. Щукиным (патент № 2015941 от 14.10.1991) и затем подхвачена многими исследователями.

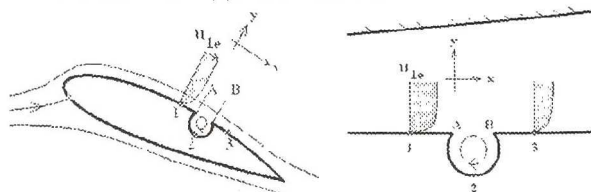


Рис.1 Вихревая ячейка на диффузорных участках тел.

В докладе представлены результаты анализа экспериментальных распределений статического и полного давлений в окрестности вихревой ячейки в виде поперечной цилиндрической траншеи на стенке канала, рис.2 ( $R \gg L \gg \delta$ , где  $R$  –