

## УДК 621.81 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА НА УЧЕБНОМ СТЕНДЕ «РЕЗОНАНС ВАЛОВ»

© А.И. Тит<sup>1</sup>, В.И. Умнов<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Проблема определения критических чисел оборотов валов машин имеет большое значение для современного турбостроения. Обеспечение надежности работы машин заключается в качественном проведении инженерных расчетов амплитудно-частотных характеристик валов. В данной статье рассмотрены вопросы исследования на учебном стенде резонанса вращающихся валов с одним диском при различной инерционной нагрузке.

*Ключевые слова:* вал, турбомашина, резонанс, критическая частота, амплитудно-частотная характеристика.

### DETERMINATION OF CRITICAL SPEEDS OF SHAFT ROTATIONS ON THE TRAINING SIMULATOR «RESONANCE OF SHAFT»

A. Tit, V. Umnov

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074.

The problem of determining the critical speeds of shaft rotation is of great importance for modern turbine manufacture. The reliability of the machines is ensured by high quality conduction of engineering analysis of amplitude-frequency characteristics of shafts. The article discusses the research of the resonance of rotating shafts with one disc at various inertial loads on the training simulator.

*Keywords:* shaft, turbomachine, resonance, critical frequency, frequency response.

Одной из актуальных сторон развития современной энергетики является повышение прочности и надежности деталей и узлов турбомашин, в частности валов (роторов) [1]. Быстроходные валы турбомашин рассчитывают не только на прочность и жесткость, но и на виброустойчивость. Во время работы в валах возникают поперечные изгибные, угловые крутильные и продольные колебания [2]. Для большинства быстроходных валов наиболее опасны изгибные колебания, которые вызываются неуравновешенностью насаженных на валы деталей (рис. 1).



**Рис. 1. Ротор турбины**

В паровой турбине вынужденные колебания вызываются толчками пара при прохождении лопаток мимо сопел и рядом других причин. Частота этих колебаний зависит от числа оборотов вала. То число оборотов вала, которое равно частоте собственных колебаний вала является его критическим числом оборотов.

Важнейшей характеристикой вала турбины является его критические частоты колебаний, и в первую очередь – первая критическая частота. При анализе амплитудно-частотной характеристики

<sup>1</sup> Тит Александра Ивановна, студентка 2 курса Института энергетики, e-mail: aleksa.tit2016@yandex.ru

Tit Aleksandra, a second-year student of Power Engineering Institute, e-mail: aleksa.tit2016@yandex.ru

<sup>2</sup> Умнов Виктор Иванович, старший преподаватель кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: umnovvi61@ramler.ru

Umnov Victor, a senior teacher of Designing and Standardization in Mechanical Engineering Department, e-mail: umnovvi61@ramler.ru

(АЧХ) ротора можно наблюдать, что при приближении к определенным значениям частоты вращения, ротор начинает испытывать значительные колебания. При изготовлении вала и установке его в подшипники не избежать некоторого эксцентриситета центра тяжести относительно оси вращения. За счет этого эксцентриситета при вращении вала появляется сила инерции, возбуждающая его поперечные колебания. При приближении частоты вращения вала к частоте его собственных колебаний амплитуда этих колебаний возрастает, а при совпадении частот стремится к бесконечности. Частота вращения вала, совпадающая с первой частотой собственных колебаний, называется критической скоростью вращения вала.

Если задержаться на такой критической частоте и не пройти ее ускоренно, то ротор войдет в резонанс (совпадение собственной частоты ротора с вынуждающей силой), из которого практически невозможно выйти и тогда машина в итоге пойдет в разнос. Поэтому турбины проектируют так, чтобы обеспечить безопасное отдаление рабочей частоты вращения от этих критических частот. Валы паровых турбин бывают жесткого и гибкого типа. Первые работают при числах оборотов ниже критических; вторые – при числах оборотов выше критических.

При числах оборотов, больших или меньших критического, вал будет работать спокойно за исключением тех моментов, когда число оборотов оказывается меньше критического в целое число раз. В эти моменты вибрация усиливается, хотя и не достигает такой степени, как при критическом числе оборотов. Таким образом, при пуске турбины с жестким валом приходится переходить только через резонансные числа оборотов (меньшие критического в целое число раз). При пуске же турбины с гибким валом – и через критическое число оборотов. Эти моменты предусматриваются заранее и переходят через них быстро в полном соответствии с инструкциями завода-изготовителя турбины.

Автоматизированный лабораторный комплекс «Резонанс валов» [3,4], установленный в лаборатории «Детали машин и основы конструирования» ИРНИТУ, позволяет моделировать резонанс валов турбомашин, определять первую частоту собственных колебаний вала с установленными на нем дисками и регистрировать амплитудно-частотную характеристику колебаний вращающегося вала.

Стенд включает приводной модуль с панелью управления и системой анализа информации и модуль установки исследуемого вала с перемещаемыми опорами. Привод вала осуществляется регулируемым электродвигателем, который соединяется с исследуемым валом при помощи муфты. Изменение частоты вращения вала электродвигателя осуществляется бесступенчатым регулятором. Модуль установки исследуемого вала состоит из двух опор с двухрядными сферическими подшипниками и установленного в опоры исследуемого вала. Одна из опор выполнена шарнирно-подвижной. На валу установлен диск, на который можно устанавливать два дополнительных диска.

Частота вращения вала измеряется датчиками частоты вращения ТЕКО. Амплитуда колебаний вала измеряется с помощью двух бесконтактных датчиков перемещения. Информация с датчиков перемещения и датчика частоты вращения обрабатывается и передается на компьютер. Программное обеспечение «ДМ РВ» обеспечивает возможность сохранения мгновенных значений частоты и амплитуды колебаний исследуемого вала и частоты вращения вала. Основные конструктивные особенности стенда представлены на рис. 2 и 3.

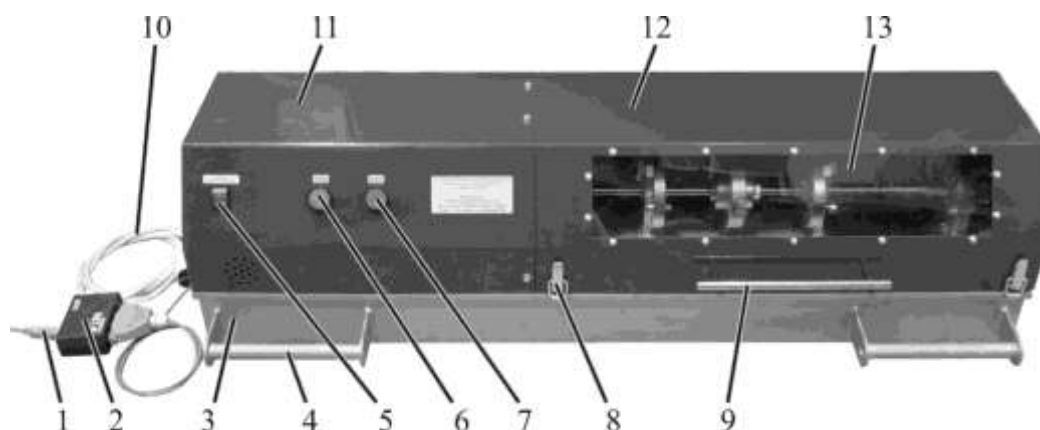
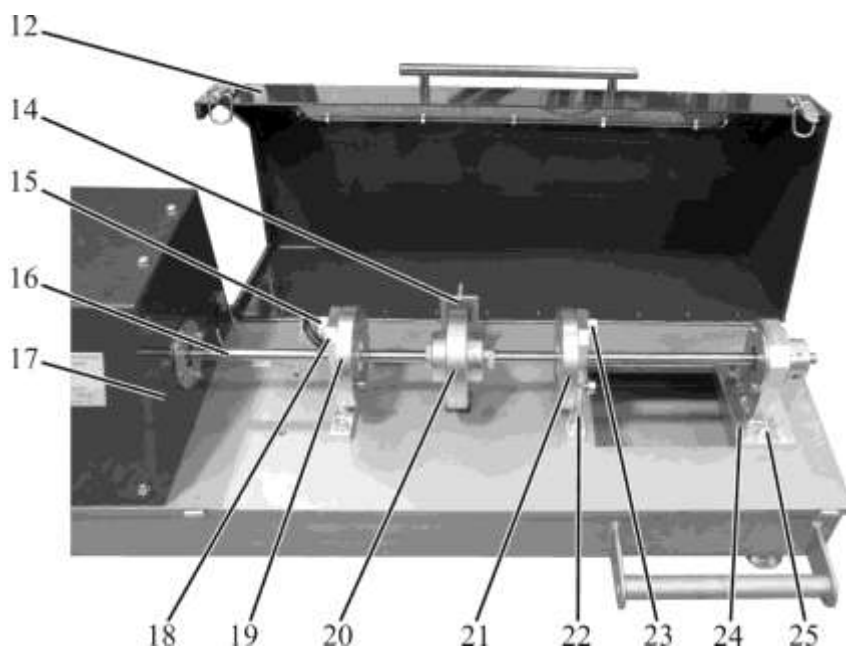


Рис. 2. Общий вид стенда



**Рис. 3. Вид на исследуемый вал**

Учебный стенд «Резонанс валов» включает в себя:

- кабель 1 USB для подключения платы АЦП-ЦАП к ноутбуку;
- плату 2 АЦП-ЦАП L-cardE-154 для сбора информации и управления стендом;
- основание 3 стенда;
- ручки 4 для транспортировки стенда;
- клавишный выключатель 5 питания системы управления стенда;
- кнопку 6 «ПУСК» для запуска электропривода вращения вала;
- кнопку 7 «СТОП» для остановки электропривода вращения вала;
- защелки 8 для фиксации защитного кожуха вала;
- ручку 9 для поднимания защитного кожуха вала;
- сетевой кабель 10 с вилкой для подключения стенда к однофазной сети переменного тока 220 В 50 Гц;

– кожух 11 приводного электродвигателя;

– защитный кожух 12, обеспечивающий безопасность работы стенда при вращении исследуемого вала;

– смотровое окно 13 в защитном кожухе 12 для наблюдения за исследуемым валом.

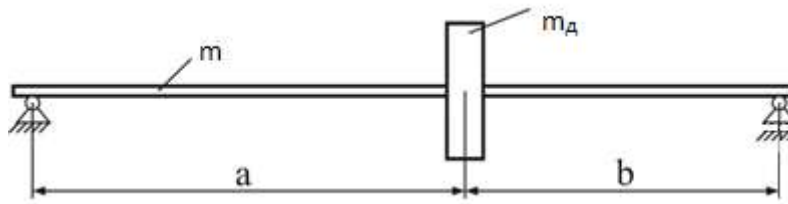
Под защитным кожухом 12 установлены:

- бесконтактные датчики 14 для измерения перемещения вала;
- исследуемый вал 16;
- левая опора 17 с установленным подшипником вала 16;
- левый ограничитель амплитуды 18 с невыпадающим винтом 15 для крепления дополнительного диска;
- дополнительный диск 19 с двумя невыпадающими винтами на М8;
- основной диск 20, закрепленный на валу 16;
- дополнительный диск 21 с двумя невыпадающими винтами на М8;
- правый ограничитель амплитуды 22 с невыпадающим винтом 23 для крепления дополнительного диска;
- правая опора 24 с установленным подшипником вала 16;
- винты 25 для фиксации правой опоры на основании стенда.

Собственную частоту колебаний вала, установленного на двух опорах, с диском (рис. 4) определяем, как для одномассовой системы по формуле [5,6]:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M}},$$

где  $c$  – коэффициент жесткости вала,  $M$  – приведенная масса вала и диска,



**Рис. 4. Расчетная схема вала**

При расположении диска между опорами приблизительно посередине вала и массе вала сравнимой с массой диска приведенную массу с приемлемой точностью определяем:

$$M = m_d + 0,5m,$$

где  $m_d$  – масса диска,  $m$  – масса вала.

Коэффициент жесткости вала

$$c = \frac{F}{y_{ст}} = \frac{3E\pi d^4}{32a^2b^2} (a+b),$$

где  $y_{ст}$  – статический прогиб вала от действия силы тяжести  $F = Mg$ ,

$$y_{ст} = \frac{Fa^2b^2}{3EI(a+b)} = \frac{32Fa^2b^2}{3E\pi d^4(a+b)},$$

здесь  $I = \frac{\pi d^4}{32}$  – осевой момент инерции сечения вала диаметром  $d$ ,  $E$  – модуль упругости материала вала.

При вынужденных колебаниях амплитуда перемещения центра масс вала зависит от частоты вращения следующим образом:

$$y = \frac{e}{1 - \nu_B^2 \nu^2},$$

где  $e$  – эксцентриситет центра масс вала с диском относительно оси вращения,

$\nu_B$  – частота вынужденных колебаний системы.

По последней зависимости видно, что при повышении частоты вращения выше первой критической скорости амплитуда колебаний уменьшается и стремится к нулю при неограниченном возрастании частоты. После перехода через критическую частоту вращения наступает динамическое центрирование вала, т. е. центр тяжести несбалансированной массы приближается к геометрической оси вращения.

*Справочные данные по стенду:*

вал – диаметр  $d=12$  мм, модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па, масса  $m = 0,56$  кг;

диск основной – масса  $m_d = 1,8$  кг, диски дополнительные – масса  $m_{дд} = 0,7$  кг.

Лабораторный практикум [4] предусматривает выполнение следующих лабораторных работ:

1) определение критических частот вращения вала при различной инерционной нагрузке;

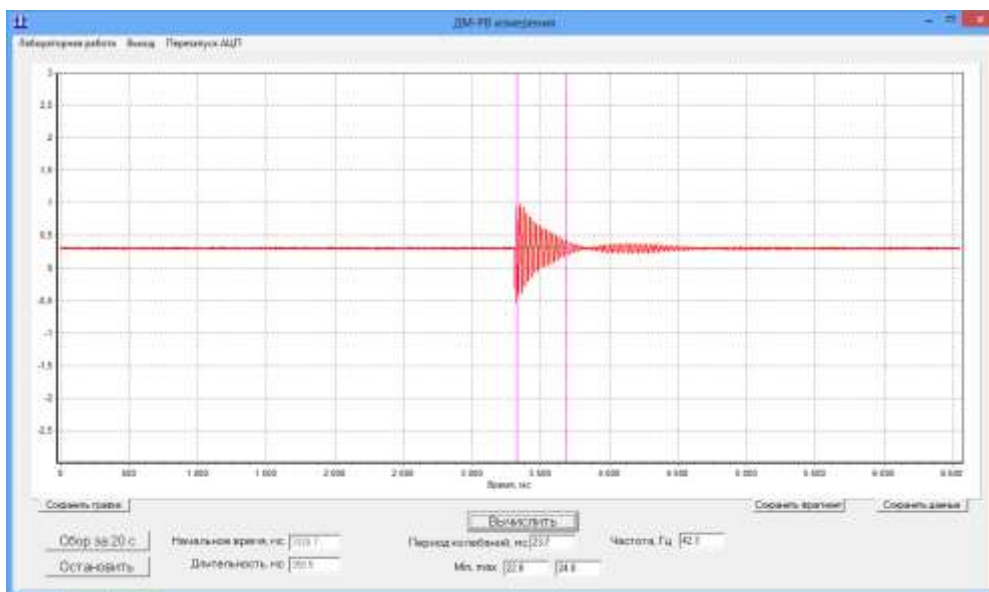
2) определение критических частот вращения вала при различном расстоянии между опора-

ми;

3) определение амплитудно-частотной характеристики вала при различной инерционной нагрузке;

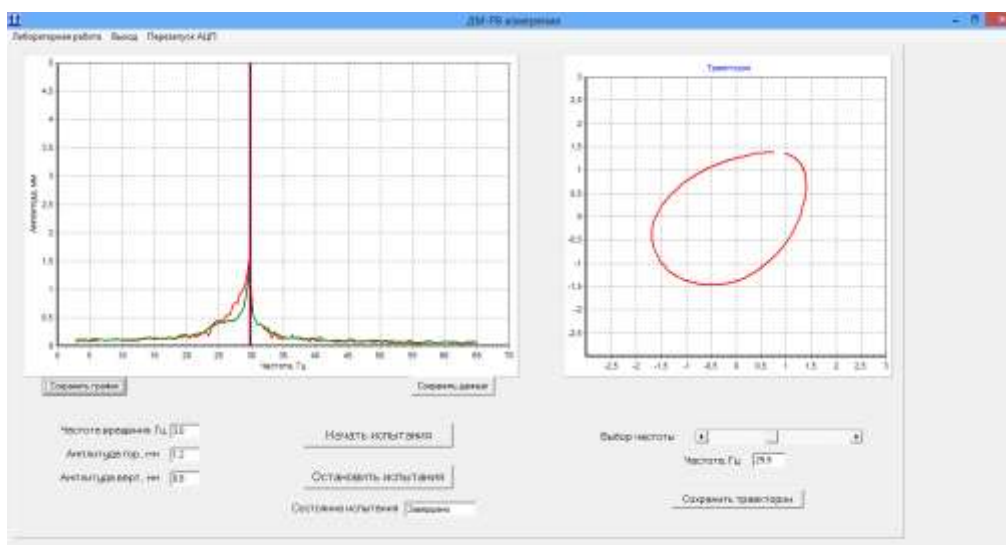
4) определение амплитудно-частотной характеристики вала при различном расстоянии между опорами.

При исследовании свободных колебаний вала (работа 1 и 2) первая собственная частота, следовательно, и первая критическая скорость, определяется по осциллограмме перемещений вала при его свободных колебаниях без вращения вала. Параметры, отображающие ход эксперимента и его итоги отслеживаются в автоматизированном режиме, благодаря ориентированному для этого интерфейсу встроенного программного обеспечения (рис. 5).



**Рис. 5. Рабочее окно программного обеспечения «Определение собственной частоты»**

При исследовании вынужденных колебаний (работа 3 и 4) производится запись амплитудно-частотной характеристики, по которой определяется критическая скорость вала (рис. 6). Экспериментально определяется зависимость амплитудно-частотной характеристики вала от массы диска и от расстояния между опорами.



**Рис. 6. Рабочее окно программного обеспечения «Запись АЧХ»**

Изучение конструкции учебного стенда и проведенные тестовые эксперименты позволили сделать следующие выводы:

1. Использование учебного стенда дает наглядное представление о резонансе валов и влиянии инерционной нагрузки на критическую частоту вращения вала.
2. Конструкция стенда предусматривает изменение только положение правой опоры вала, положение диска на валу зафиксировано, а датчики перемещения диска установлены без возможности их переустановки, что снижает возможности стенда.
3. Не во всех случаях различие частоты в минимальном и максимальном периоде свободных колебаний удавалось достичь меньше 5 %.
4. При высокой частоте вынужденных колебаний порядка 34 Гц эксперимент останавливается стендом до достижения критической частоты, что необходимо учесть при задании расстояния между опорами.

### Библиографический список

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : ИД МЭИ, 2007. 476 с.
2. Елисеев Ю.С. Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок: учебник / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, Э.А. Манушин, И.Г. Суровцев; под общ. ред. М.И. Осипова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 519 с.
3. Автоматизированный лабораторный комплекс «Детали машин – резонанс валов». ООО НПП «Учтех-Профи»: руководство пользователя. Челябинск : Изд-во ЮУрТУ, 2014. 10 с.
4. Королев П.В., Форенталь М.В. Детали машин и основы конструирования: лабораторный практикум. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 116 с.
5. Учаев П.Н. Детали машин и основы конструирования. Основы теории и расчета: учебник / П.Н. Учаев, С.Г. Емельянов, С.П. Учаева, Е.В. Павлов; под общ. ред. П.Н. Учаева. Старый Оскол : ТНТ, 2015. 343 с.
6. Еремеев В.К., Горнов Ю.Н. Детали машин и основы конструирования: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 405 с.