

Голографические исследования особенностей колебаний дисков

А. М. Царева¹, Н. И. Шакиров¹, Р. Р. Кулмакова¹, К. А. Царева², Р. Х. Макаева¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

В статье представлены голографические исследования особенностей колебаний круглых пластин-дисков. Рассмотрены в резонансном спектре парные (кратные) формы колебаний пластин с одинаковым количеством узловых окружностей и диаметров, повернутых на некоторый угол. Результаты экспериментальных исследований показали различие частот у кратных форм, хотя теоретические расчеты показывают их совпадение.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, круглые пластины-диски, резонансные частоты, формы колебаний.

Цитирование: Царева, А. М. Голографические исследования особенностей колебаний дисков / А. М. Царева, Н. И. Шакиров, Р. Р. Кулмакова, К. А. Царева, Р. Х. Макаева // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 306–309.

С возникновением и развитием высокоинтеллектуальных программных комплексов, применяемых в механике, появилась перспектива замены трудоемких экспериментальных исследований на расчетные. Однако, как показывает практика, в некоторых случаях необходимы проверка, подтверждение правильности выполненных расчетных работ. На примере исследований особенностей колебаний дисков доказана необходимость выполнения таких экспериментальных работ.

Рабочие колеса — вращающиеся диски, укрепленные на валу, являются основными деталями в двигателях изделий машиностроения. Актуальной задачей является определение резонансных (собственных) частот и форм колебаний.

Прежде чем приступать к исследованию реальных рабочих колес основополагающие результаты получают при изучении колебаний круглых пластин постоянной толщины.

Однородные диски представляют собой поворотно-симметричные системы. Одной из особенностей колебаний таких систем является наличие в резонансном спектре парных (кратных) форм с одинаковым количеством s узловых окружностей и p узловых диаметров, повернутых на некоторый угол. теоретические расчеты показывают совпадение частот таких форм. Однако при колебаниях реальных объектов резонансные частоты кратных форм отличаются.

Тестируемый диск насаживался на экспериментальном голографическом стенде в вертикальном положении и крепился жестко на оси, проходящей через его центр [1]. Для образования собственных форм колебания возбуждались пьезоэлектрическим вибратором. Звуковые

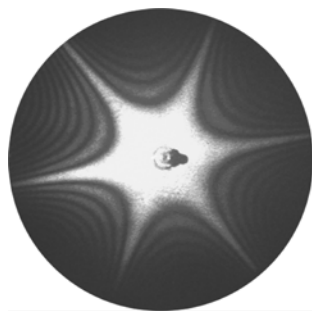
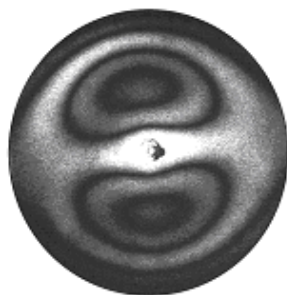


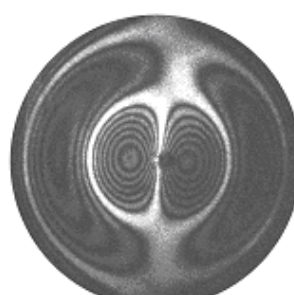
Рис. 1. Голографическая интерферограмма формы колебаний однородного диска с тремя узловыми диаметрами (форма F_{03})



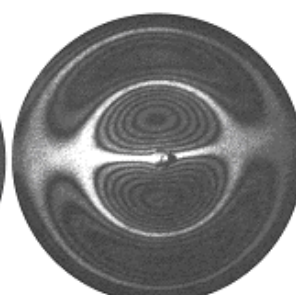
а) $f=2429$ Гц



б) $f=2526$ Гц



а) $f=4919$ Гц



б) $f=5021$ Гц

Рис. 2. Кратные формы F_{11} колебаний однородного диска

Рис. 3. Кратные формы F_{21} колебаний однородного диска

сигналы от вибрирующего диска регистрировался микрофоном, адаптированным к компьютеру (значение резонансной частоты высвечивалось на экране компьютера).

Формы колебаний дисков были получены голографическим методом усреднения по времени. Определенная форма колебаний диска обозначается символом F_{sn} , где s — число узловых окружностей, n — число узловых диаметров. Например, на рис. 1 приведена форма колебаний F_{03} диска с $s = 0$ и $n = 3$, то есть с тремя узловыми диаметрами. Яркие белые линии на рисунке формы являются узловыми. Чередующиеся светлые и темные полосы соединяют места с одинаковыми перемещениями.

В результате голографических исследований было получено несколько видов кратных форм с одинаковым количеством s узловых окружностей и n узловых диаметров, повернутых на некоторый угол. На рис. 2 представлены голографические интерферограммы колебаний диска толщиной $h = 3$ мм из стали. Форма F_{11} — одна узловая окружность и один узловой диаметр. Частоты собственных колебаний отличались на 100 Гц. Угол взаимного поворота узловых диаметров составил 90° . Различие частот можно объяснить нарушением различного рода симметрии [2]. К ним можно отнести геометрическую, массовую и упругую неоднородность; неточность граничных условий (недостаточно точная центровка посадочного отверстия).

На рис. 3 приведены кратные формы колебаний двух дисков толщиной $h = 2$ мм.

Диски совершают резонансные колебания по форме F_{21} — две узловые окружности и один узловой диаметр. Различие резонансных частот составило приблизительно 100 Гц, угол взаимного поворота узловых диаметров — 90° .

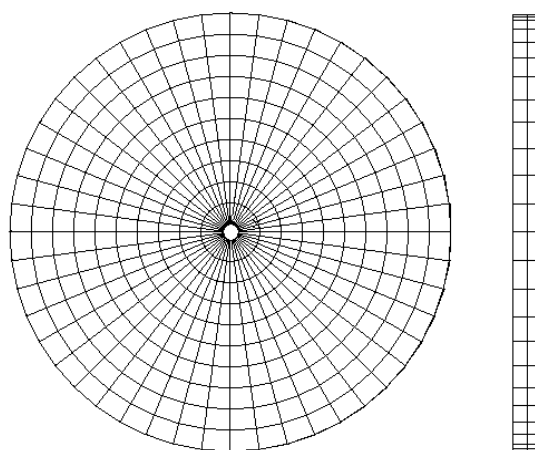


Рис. 4. Модель диска, разбитого на элементы (вид спереди и сбоку)

Проводились теоретические исследования по определению собственных частот и форм колебаний диска численным методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе ANSYS [2]. При выполнении расчетов было исследовано применение нескольких типов конечных элементов и размеров сеток. Наименьшее расхождение, до 5-ти процентов, обеспечило применение трехмерного кубического граничного элемента SOLID 186 [3]. Приемлемое расхождение расчетных значений с экспериментальными обеспечило применение сетки с 48-ю радиусами, 10-ю окружностями и 2-мя слоями (рис. 4).

Закрепление диска в центре определялось соответствующим граничными условиями в виде ограничений на перемещения на все степени свободы и прилагались к соответствующим узлам на внутренней поверхности созданного «цилиндра» (перемещение во всех направлениях равно 0).

Для нахождения собственных частот колебаний выбран модальный тип анализа. Полученные теоретические значения сравнивались с экспериментальными. Был получен спектр собственных форм.

Расчетным путем исследовались кратные формы колебаний. Для диска из стали ($h = 2$ мм) они представлены на рис. 5.

Расчеты показали, что кратные формы характерны для всех видов колебаний, имеющих узловые диаметры. Определены резонансные частоты, расчетные значения которых для таких парных форм совпали.

В результате проведенных голографических исследований установлено, что кратные формы с реальными резонансными частотами можно получить только экспериментально. Различие частот определяется степенью и характером асимметрии пластины. Поэтому очевидно, что теоретический расчет резонансных частот кратных форм колебаний реальных объектов представляет труднорешаемую задачу, поскольку параметры асимметрии реальных объектов определить сложно.

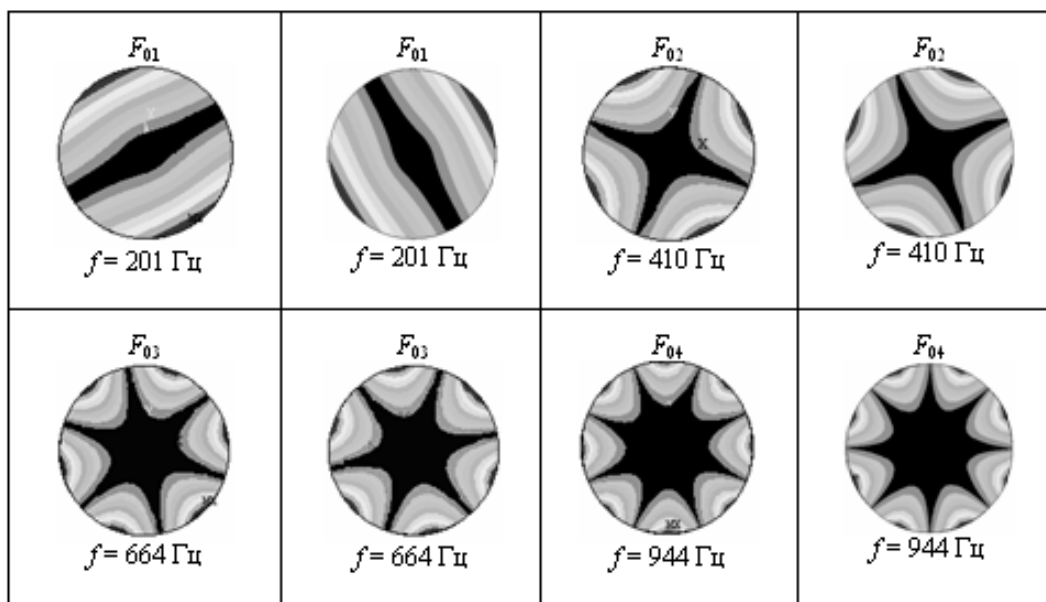


Рис. 5. Кратные формы колебаний диска

Следовательно, определение резонансных частот кратных форм реальных объектов возможно только экспериментальным путем.

Таким образом, эксперименты по определению кратных частот показали, что одна и та же форма колебаний может появляться на различных резонансных частотах. В рассмотренных примерах разница частот достигала 100 Гц. Поворот картины узловых линий — 90°.

Список источников

- [1] Макаева, Р. Х. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии / Р. Х. Макаева, А. Х. Каримов, А. М. Царева. — Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та., 2011. — 242 с.
- [2] Иванов, В. П. Колебания рабочих колес турбомашин. — М. : Машиностроение, 1983. — 224 с.
- [3] Царева, А. М. Применение экспериментально-расчетного метода для определения резонансных частот и форм колебаний диска постоянной толщины / А. М. Царева // Информационные и социально экономические аспекты создания современных технологий. — 2006. — № 9. — 7 с.