

СИЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЦИРКУЛЯРНОЙ ВИБРАЦИИ

Самохвалов В.Н.

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева, Самара*

Ключевые слова: дисбаланс, вибрация, взаимодействие.

Аннотация. Экспериментально установлено, что при высокоскоростном вращении заземленного, динамически несбалансированного диска из не ферромагнитного материала и возбуждении круговой вибрации экрана происходит их силовое взаимодействие. В условиях технического вакуума возбуждается вращение экрана и его отталкивание от диска, расположенного на расстоянии 1,5-4 мм. При вращении сбалансированного диска и отсутствии круговой вибрации экрана силовое взаимодействие не зафиксировано.

FORCE EFFECTS AT LOW-FREQUENCY CIRCULAR VIBRATION

Samokhvalov V.N.

Samara National Research University, Samara

Keywords: imbalance, vibration, interaction.

Abstract. It has been experimentally established that during high-speed rotation of a grounded, dynamically unbalanced disk made of non-ferromagnetic material and excitation of circular vibration of the screen, their force interaction occurs. Under conditions of technical vacuum, the screen rotates and repulses it from a disk located at a distance of 1.5-4 mm. When the balanced disk rotates and there is no circular vibration of the screen, the force interaction is not fixed.

Круговая (циркулярная) вибрация приводит к возникновению нагрузок на опоры и подшипники. Они испытывают действие циклически изменяющихся динамических давлений, которые могут привести к их усталостному разрушению или разрушению от вибраций.

Цель экспериментальных исследований – выявление дополнительных механических эффектов, обусловленных круговой вибрацией не ферромагнитных и электрически нейтральных масс (дисков). С целью минимизации влияния газовой среды на процесс вращения тонкостенных (0,9-1,2 мм) дисков малой массы (0,05 кг), эксперименты проводились в условиях технического вакуума [1]. Экспериментальное устройство закреплялось внутри заземленной вакуумной камеры. Откачка воздуха осуществлялась форвакуумным насосом НВЗ-300, а затем бустерным паромасляным насосом 2НВБМ-160 до 0,1065 Па. Глубина вакуума измерялась термопарным вакуумметром ВТ-2А-П. Камера имела окно для наблюдения и видеосъемки процесса и вакуумный разъем для подключения источника постоянного тока и тензостанции.

В первой серии экспериментов использовалось устройство (рис. 1). На стальной плите 1 установлен коллекторный электродвигатель постоянного тока 2 Д-14ФТ2с. Плита жестко зафиксирована внутри вакуумной камеры. К фланцу на оси электродвигателя 2 крепился диск 3. Частота вращения ротора

электродвигателя фиксировалась бесконтактным (лазерным) цифровым тахометром Mastech MS6208B.

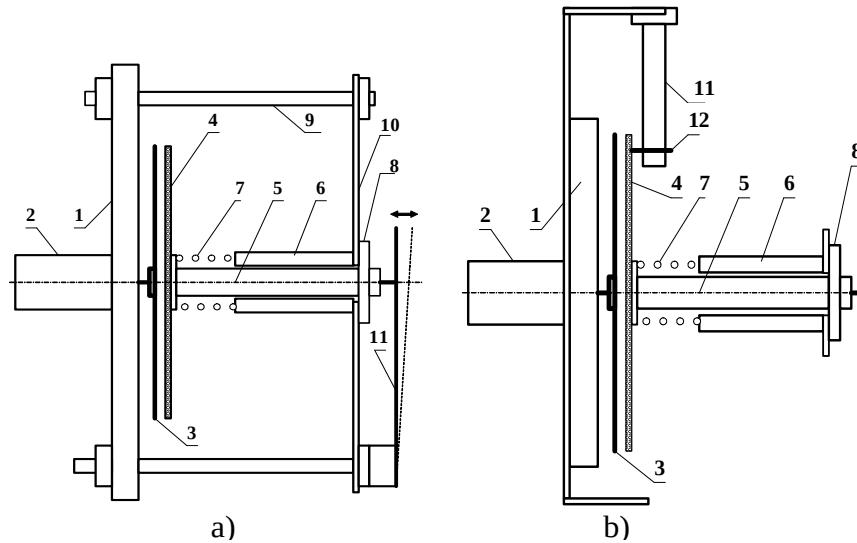


Рис. 1. Схемы устройств для измерения силы отталкивания (а) и крутящего момента (b)

Первоначально было использовано устройство (рис. 1, а), позволяющее измерять силу отталкивания, действующую на экран 4. Диск 3 диаметром 165 мм был изготовлен из листа алюминиевого сплава АМгЗМ толщиной 0,9 мм и установлен на фланце ротора электродвигателя 2 с начальным эксцентриситетом порядка 0,2-0,3 мм. При этом был задан перекося оси диска относительно оси ротора электродвигателя, вызывавший при его вращении начальное осевое биение на торце диска порядка 1,5-2 мм. При вращении диска 3, вследствие динамического дисбаланса возникало коническое вращение оси ротора электродвигателя. Это возбуждало круговую вибрацию устройства, передававшуюся через металлические элементы устройства на экран 4. Экран 4 был изготовлен из плотного картона толщиной 3 мм обклеенного алюминиевой фольгой, а также из листа алюминиевого сплава АМг6 диаметром 170 мм, толщиной 1,35 мм.

Экран 4 совместно с осью 5 имел возможность осевого перемещения во втулке 6 закрепленной на траверсе 10, преодолевая сопротивление пружины 7. Величина перемещения и действующее усилие измерялись с помощью тензодатчика 11. Усилия предварительного сжатия пружины 7 было задано равным 2 Н. Начальный зазор между диском 3 и экраном 4 был установлен порядка 3-3,5 мм (по оси ротора), что гарантированно исключало их механический контакт. После раскрутки ротора электродвигателя до частоты вращения 100-150 Гц возникала круговая вибрация экрана 4. Начиналось отталкивание экрана от диска, а затем начиналось его вращение в сторону вращения диска (см. <http://www.youtube.com/watch?v=NZaZIKiUEZo>). Тензодатчик перемещений показывал отталкивание экрана от диска на расстояние порядка 1,5-2 мм. Соответствующая этому сила, согласно тарировочной зависимости, составляла порядка 2,5-2,7 Н при весе вращающегося диска 0,5 Н. Частота вращения экрана составляла 2-3 Гц.

Во втором эксперименте, для измерения крутящего момента, вызывающего вращение экрана 4, было использовано экспериментальное устройство (рис. 1, b), где датчик перемещений 11 контактировала со штифтом 12, жестко связанным с экраном. Как показали измерения, при той же частоте вращения диска и зазоре между диском и экраном, величина крутящего момента, действующего на экран 4, составляла около 0,01 Н·м.

Эффект отталкивания и вращения экрана был зафиксирован только при начальном зазоре между диском и экраном не более 4-5 мм. При отсутствии динамического дисбаланса вращающегося диска 3 отталкивание и вращение экрана 4 также не наблюдалось.

Затем эксперименты были проведены при вакууме до $945 \cdot 10^{-6}$ Па. Экспериментальное оборудование (рис. 1) устанавливалось в вакуумной камере установки УВН-2М-2. Откачка воздуха производилась пластинчато-роторным насосом ВН-6-2М, а затем паромасляным насосом Н-2Т с азотной ловушкой. Глубина вакуума измерялась ионизационно-термопарным вакуумметром ВИТ-2П. Экран 4 был изготовлен из листа алюминиевого сплава АМг6 диаметром 170 мм, толщиной 1,35 мм, а диск 3 из титанового сплава ОТ-4 диаметром 162 мм, толщиной 0,65 мм. Первоначальный зазор между диском и экраном по оси ротора задавался в диапазоне 2,5-3 мм. При кратковременном включении электродвигателя (для исключения образования кругового огня на коллекторе) при частоте вращения диска 3 150-170 Гц частота вращения алюминиевого экрана составляла порядка 1,5-2 Гц. Достаточно высокая глубина вакуума дает основание полагать, что наблюдаемое воздействие диска на экран не обусловлено остаточной газовой средой.

Во второй серии экспериментов использовалось устройство (рис. 2), смонтированное на двух стальных плитах 5 и 6. Плиты связаны четырьмя стальными колонками, позволяющими изменять зазор между диском 1 и экраном 2.

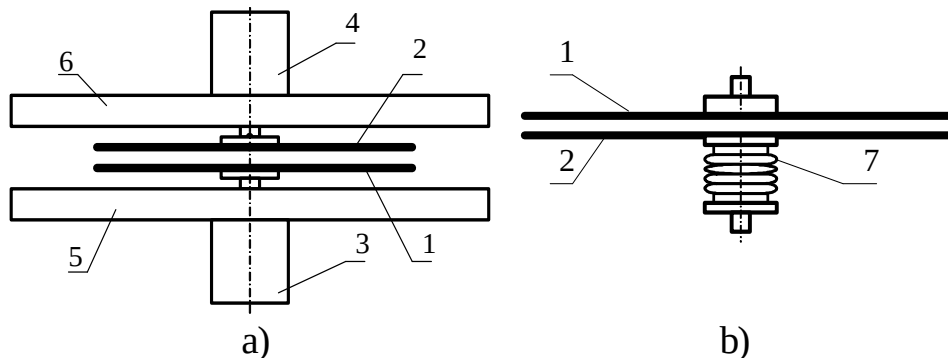


Рис. 2. Схемы устройства с жесткой установкой экрана (a) и с экраном на сильфоне (b)

Диск и экран диаметром 165 мм и толщиной 0,9 мм были изготовлены из алюминиевого сплава АМгЗМ. Диск 1 жестко крепился к ротору электродвигателя 3 со смещением и перекосом его оси относительно оси ротора, как и в первой серии экспериментов. Экран 2 устанавливался на роторе электродвигателя 4 жестко (рис. 2, a) и на сильфоне (рис. 2, b). Использовались коллекторные электродвигатели Д-14ФТ2с имеющие электромагнитную муфту, позволявшую

затормаживать и освобождать ротор электродвигателя 4 без подачи напряжения на его рабочие обмотки. Устройство жестко фиксировалось в вакуумной камере. Эксперименты проводились при глубине вакуума 1,33 Па. При включении электродвигателя 3 осевое биение торца диска 1 при его вращении составляло порядка 1-1,5 мм, а радиальное биение порядка 0,5-0,7 мм.

При жесткой установке экрана 2 (рис. 2, а) после раскрутки электродвигателя 3 до частоты вращения 150-170 Гц возбуждалась круговая вибрация экрана 2. Если ротор электродвигателя 4 был расторможен, то после этого через несколько секунд начиналось вращение экрана 2. При начальном зазоре между диском и экраном равном 1,5 мм частота вращения экрана составляла 25-30 Гц, при зазоре 3 мм порядка 7-10 Гц. При зазоре между диском и экраном более 5 мм даже сильная круговая вибрация экрана не приводила к возбуждению его вращения. При высокой степени сбалансированности диска 1 и, как следствие, отсутствии вибрации экрана 2, его вращение не возбуждалось даже при зазоре между диском и экраном 1,5 мм.

Затем экран 2 был закреплен на сильфоне 7 (рис. 2, б). Материал сильфона нержавеющая сталь, толщина стенки 0,25 мм, наружный диаметр 27 мм. Начальный зазор по оси ротора между диском и экраном 2,5 мм. Ротор электродвигателя с сильфоном первоначально был заторможен. После раскрутки электродвигателя привода диска 1 до частоты вращения 130-150 Гц, за счет упругой деформации оболочки сильфона, начиналась прецессия оси экрана 2 с частотой порядка 5-8 Гц в сторону вращения диска 1. Величина осевых колебаний торца экрана достигала 5-6 мм. Это значительно больше начального зазора между диском и экраном, но при этом экран не вступал в механический контакт с диском. Наблюдалось отталкивание экрана от диска и, за счет упругой деформации оболочки сильфона, увеличивалось среднее расстояние между диском и экраном (см. <http://www.youtube.com/watch?v=yi3s1RcqLEw>). При растормаживании ротора электродвигателя, на котором закреплен сильфон, экран 2 начинал вращение в сторону вращения диска 1, с частотой порядка 1-3 Гц, а амплитуда его прецессии уменьшалась. Взаимодействие дисков наблюдалось при начальном зазоре между ними 1,5-4 мм. При начальном зазоре между диском и экраном равном 5 мм имела место небольшая прецессия оси экрана, но его вращение не возбуждалось.

Из экспериментов следует, что необходимым условием возникновения силового взаимодействия неферромагнитных и электрически нейтральных тел является: а) наличие прецессии оси при вращении с динамическим дисбалансом близко расположенных тел, б) наличие динамического дисбаланса одного вращающегося тела и круговой вибрации второго тела.

При аварии гидроагрегата на Саяно-Шушенской ГЭС [2], вращение динамически разбалансированного ротора (вибрация турбинного подшипника) вызвало круговую вибрацию крышки гидроагрегата. Это, как в вышеприведенных экспериментах, привело к возникновению силы отталкивания и возбуждению вращающего момента, действовавших на крышку. В совокупности с действием сил от вибрации, давления напора воды и усталостных явлений это привело к обрыву и срезанию шпилек крепления крышки, ее

последующему подъему и вращению крышки гидроагрегата, зафиксированному камерами наблюдения.

Вибрации генератора не могли привести к срыву крышки. Генераторный подшипник закреплен в крестовине генератора [3], которая находится в железобетонной «бочке» генератора, являющейся частью железобетонной плотины и весит тысячи тонн. Если бы вибрации ротора были бы такими большими, что могли сорвать крышку, то были бы вызваны такой вибрацией разрушения других рядом расположенных и соседних конструкций. А этого не было, сорвало только крышку генератора, которая просто герметизирует агрегат и не воспринимает силовую нагрузку от ротора генератора.

Аналогичный эффект наблюдается в вихревых устройствах. В работе [4] показано, что в вихревой трубе возбуждается вращение сердечника, происходит его изгиб и излом. Эта сила и крутящий момент не обусловлены механическим действием вращающегося газа и возникают только при возбуждении прецессионного вращения сердечника [5]. Прецессия оси сердечника и круговая вибрация корпуса вихревой камеры приводит к возникновению наблюдаемого силового взаимодействия.

Список литературы

1. Самохвалов В.Н. Бесконтактная передача вращения и отталкивание масс в вакууме // Вестник СамГУПС. – 2015. – № 2-2(28). – С. 164-171.
2. Зеленохат Н.И. Технологические причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2010. – № 1. – С. 35-41.
3. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. – Произв. изд. – Красноярск: Суриков, 1999. – 560 с.
4. Самохвалов В.Н. Механические эффекты в вихревом устройстве с вращающимся сердечником // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43, № 9. – С. 89-94.
5. Самохвалов В.Н. Условия возбуждения вращения сердечника в вихревом устройстве // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, № 8. – С. 70-76.

Сведения об авторе:

Самохвалов Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.