

УДК 534.1, 621.1

ТРАЕКТОРИИ ПЛАВАЮЩИХ КОЛЕЦ В РОТОРНЫХ МЕХАНИЗМАХ. КИНЕМАТИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Людмила Яковлевна Банах, Леонид Иосифович Тывес

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

banl@inbox.ru, l-tyves@hovrino.net

Аннотация. Исследуется кинематика движений плавающих колец роторного механизма при установившихся низкооборотных режимах вращения. С этой целью изготовлена экспериментальная установка. Кольцо установлено с зазором относительно ведущего цилиндрического звена и обегает его при постоянном контакте с ним. Показано, что движение кольца при «лунном» движении ведущего звена представляет собой прямую асинхронную прецессию, при котором его точки описывают траектории типа эпитрохоиды.

Ключевые слова: ротор, механизм, плавающее кольцо, контакт, прецессия кольца, траектории.

Поддержано грантом РФФИ № 18-08-00-171а.

THE FLOATING RINGS TRAJECTORIES IN ROTOR MECHANISMS. KINEMATICS AND EXPERIMENT

L.Ya. Banakh, L.I. Tyves

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

banl@inbox.ru, l-tyves@hovrino.net

Abstract. The kinematics of motion for floating rings in rotary mechanism under steady low-speed rotation speed is studied. For this purpose, an experimental stand was created. The ring is installed with a clearance relative to the leading cylindrical link and runs around it with a constant contact. It is shown that the ring motion during the "lunar" motion of the leading link is a forward asynchronous whirling, in which its points describe the trajectories as epitrochoids types.

Key words: rotor, mechanism, floating ring, contact, the ring whirling, trajectory.

Постановка задачи. В роторных механизмах нередко происходит контакт вращающегося ротора с элементами роторной системы. При этом могут быть выделены две различные ситуации: 1) контакты ротора с неподвижным или упруго-закрепленным жестким статором; 2) контакты ротора с подвижными элементами (плавающие или пальчиковые уплотнения, гидростатические опоры с плавающими втулками, инерционные вибродробилки). При этом плавающие элементы в свою очередь могут контактировать со статором или другими плавающими элементами.

Контактные режимы в этих двух случаях существенно различны. В первом случае возникает обкатка ротора изнутри по статору, что сопровождается проскальзыванием ротора и приводит к быстрому износу подшипников и тяжелым аварийным ситуациям. Ротор при обкатке совершает асинхронную прецессию в направлении, противоположном скорости вращения (обратная прецессия). При этом скорость прецессии чрезвычайно велика, и давление на статор может в десятки раз превышать вес самого ротора [1-6]. Вследствие того, что прецессия обратная траектории точек ротора представляют собой гипотрохоиды.

Второй тип контактных режимов - это вращение ротора внутри легких подвижных элементов системы, например, в подшипниках с плавающей втулкой, внутри плавающих уплотнений [7-10]. Плавающие уплотнения обеспечивают хорошую герметизацию уплотнения. Такие режимы при низких скоростях вращения ротора специально поддерживаются в инерционных вибродробилках [2]. Возникновение контактных режимов может привести к повреждению и даже разрушению плавающих элементов. При этом плавающее кольцо «обегает» ротор снаружи в режиме прямой прецессии [3]. В дальнейшем (в отличие от режима обкатки ротора по неподвижному основанию) будем называть такие режимы *обеганием* кольца вокруг ротора. Такого класса системы относятся к механизмам с высшими кинематическими парами.

В статье рассматривается система «ротор- плавающее кольцо». Приводится анализ траекторий, полученных на экспериментальной установке, моделирующей процесс «обегания». Процесс обегания – это достаточно сложный многочастотный режим. Поэтому, прежде чем исследовать этот процесс в роторных системах, необходимо вначале на модельной установке исследовать кинематику движений кольца при малых скоростях вращения, найти его траектории и выявить основные закономерности. Найдены экспериментальные траектории движения кольца при различных параметрах системы, что позволяет развить и уточнить результаты теоретического исследования [11].

Описание экспериментальной установки. Для моделирования процесса обегания была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка, кинематическая схема и общий вид которой представлены на рис. 1 а, б.

На основании 1 (рис.1, б) установлен двигатель 2 вращения ведущего вала модели с рычагом 3, шарнирно связанным на одном конце с осью 4, на которой укреплены шайба 5, моделирующая ротор, и одну из шестерён зубчато-ременной передачи 8. На другом конце рычага 3 установлен противовес 12, уравнивающий рычаг 3 с несомыми элементами относительно оси его вращения. Кольцо 6, охватывающее шайбу 5 с зазором, лежит на бумажном листе 11 на стеклянной подложке 10. Плоскость стеклянной подложки и, соответственно, бумажного листа перпендикулярна осям вращения рычага 3 и шайбы 5. Зазор между нижней плоскостью шайбы 5 и бумажным листом 11 не превышает 0,5 мм.

Ступица второй шестерни 7 зубчато-ременной передачи 8 установлена либо с возможностью вращения вместе с ведущим валом модели с рычагом 3, либо с фиксацией относительно неподвижной ступицы на основании 1. Для имитации лунного вращения модели ротора ось 4 с шайбой 5 и первой шестерёнкой зубчато–ременной передачи 8 фиксируется относительно рычага 3 винтом 9. Перенос винта 9 в позицию 9' с фиксацией вращений второй шестеренки 7 относительно основания 1 преобразует движение шайбы 5 в круговое поступательное движение. В этом случае шайба 5 и кольцо 6 образуют систему типа «хула-хуп». В настоящей работе исследуется кинематика роторной системы с «лунным» движением ротора.

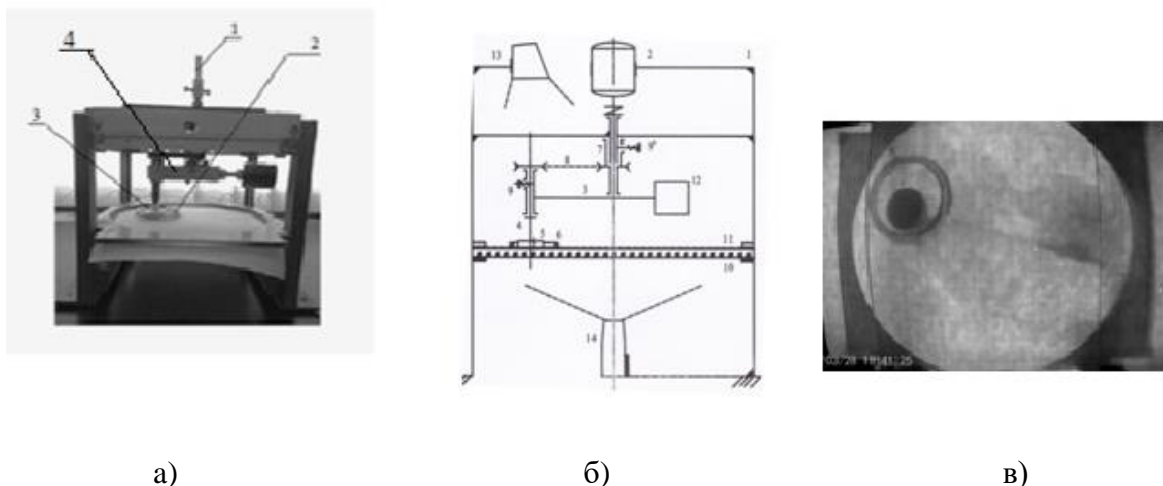


Рис. 1: а) общий вид экспериментальной установки для кинематического анализа траекторий кольца при «обегании»: 1- двигатель, 2- кольцо, 3- шайба, 4- рычаг, передающий вращение от двигателя к шайбе 3; б) кинематическая схема экспериментальной установки; в) кадр видеосъемки вращения кольца при его обегании вокруг ротора.

Установка оснащена приборами освещения 13, установленными сверху, и видеокамерой 14 – снизу. На кольце 6 имеются видимые на кадрах видеосъёмки метки (рис.1в). Путём покадровой обработки строятся траектории движения кольца.

Параметрами данной установки являются: длина рычага $a = 40$ мм, радиус вращающейся шайбы $r = 10$ мм, внутренние радиусы сменных колец, совершающих обегание: $R = 11,5$ мм, 19 мм, 35 мм.

При указанных соотношениях параметров a , r эта установка отличается от традиционных систем «ротор - плавающее кольцо». Отличие так же и в скоростях вращений. В экспериментальной установке они много ниже первой критической скорости вращения роторных систем. Однако, в ней отражена специфическая особенность роторных систем, а именно, «лунное» движение неуравновешенного ротора. При установившемся движении вследствие равенства частот вынужденных колебаний ротора частоте прецессии каждая точка ротора сохраняет свое положение относительно оси вращения, то есть имеет место прямая синхронная прецессия ротора [13].

Некоторые особенности режима обегания в экспериментальной установке. Прежде, чем перейти к описанию кинематической модели системы «вращающаяся шайба - плавающее кольцо», оценим влияние центробежных сил и сил трения, действующих на кольцо в установившемся режиме движения. В рассматриваемой модели ось шайбы вертикальна, а кольцо скользит как по горизонтальной плоскости, так и по цилиндрической поверхности относительно шайбы.

В установившемся режиме движения при постоянной скорости вращения кольца относительно его центра масс момент сил инерции кольца равен нулю.

Силы сухого трения кольца при скольжении по горизонтальной поверхности в случае низких скоростей вращения не симметричны относительно вектора скорости центра масс кольца. Сила трения на участке кольца с меньшим значением скоростей скольжения (то есть расположенном ближе к оси вращения «ротора») больше, чем сила трения на участке кольца с большим значением скоростей скольжения. Первые приближаются к силам трения покоя, а

вторые к силам трения движения. Гипотетически, эта асимметрия сил трения позволяет представить их в виде вектора силы трения, равного сумме сил трения приведенных к центру масс кольца, и направленного по касательной к траектории его движения, и момента сил трения, равного произведению разности сил трения на упомянутых участках кольца на средний радиус кольца. Такая же ситуация может иметь место вследствие разности технологических сопротивлений среды, в которой перемещается кольцо, и её нетрудно воспроизвести в экспериментах.

Сумма векторов силы трения и центробежных сил определяет как точку контакта ротора и кольца, так и величину взаимного давления в ней. От соотношения величины силы трения, создаваемой этим давлением, и усилием, создаваемым упомянутым выше моментом сил сопротивления на кольце, зависит скорость вращения кольца.

Для оценки влияния сил трения был проведен эксперимент, в котором на горизонтальную подложку был наклеен круг наждачной бумаги. При этом скорость вращения кольца увеличилась, но не достигла скорости прецессии.

Однако следует отметить, что указанные особенности относятся только к данной экспериментальной установке. Что же касается роторных систем, то в них нет горизонтальной подложки а, следовательно, и сил сухого трения между горизонтальной поверхностью и кольцом.

Кинематическая модель движений системы «вращающаяся шайба-плавающее кольцо» в режиме обегания. При соотношениях между параметрами системы, приведенными выше, взаимное расположение геометрических центров шайбы и кольца имеет вид, представленный на рис.2.

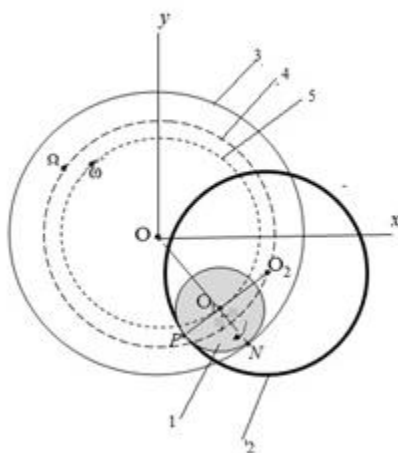


Рис. 2. Взаимное расположение центров: O- центр вращения системы, 1- шайба, 2- плавающее кольцо, 3- траектория точки N шайбы, наиболее удаленной от оси вращения, 4- траектория центра кольца O₂, 5- траектория центра шайбы O₁.

Геометрический центр O₁ шайбы совершает круговые движения с амплитудой a вокруг оси вращения O (окружность 5 на рис. 2). Рис. 2 соответствуют следующие обозначения в тексте: OO₁= a, O₁N = r - радиус шайбы, O₁O₂ = δ, PO₂ = R- радиус кольца. Точка N орбиты шайбы - наиболее удаленная от центра вращения. Эта точка при вращении шайбы описывает окружность радиуса r + a, центр которой лежит на оси вращения O (окружность 3 на рис. 2). Вращение рычага 4 имитирует вращение центра ротора, а длина рычага a- пропорциональна б

величине дисбаланса, шайба 3 при этом совершает «лунное» движение, что имитирует прямую синхронную прецессию неуравновешенного ротора [12]. Это заставляет предположить, что точка контакта на шайбе остается одной и той же.

Действительно, как показали эксперименты, при малом трении между кольцом и опорной плоскостью и сравнительно невысоких скоростях вращения ротора, когда силы инерции кольца также невелики, контакт кольца происходит в такой точке шайбы P , что угол PO_1N примерно равен $\pi/2$. При установившемся движении точка контакта P на шайбе остается практически одной и той же (рис. 2), в то время как точки контакта на кольце различны. Кольцо обкатывает шайбу без отрыва, при этом геометрический центр кольца O_2 также описывает окружность (окружность 4), концентричную окружности 3. Радиус этой окружности, определяется из треугольника $O O_1 O_2$ (рис.2) и равен $\delta = (a^2 + (R - r)^2)^{1/2}$, где R - радиус кольца.

Как показали эксперименты, скорость прецессии геометрического центра кольца совпадает со скоростью прецессии геометрического центра шайбы, как по величине, так и по направлению, то есть $\omega = \Omega$. Это объясняется тем, что прямая, соединяющая центры шайбы и кольца перпендикулярна касательной в точке контакта. Следовательно, когда точка контакта на « роторе» постоянна, скорость вращения этой прямой совпадает со скоростью вращения точки контакта. Поскольку шайба совершает прямую синхронную прецессию со скоростью ω вокруг центра вращения O , то она сообщает кольцу скорость прецессии $\Omega = \omega$ вокруг того же центра O .

Таким образом, каждая из точек плавающего кольца участвует в двух движениях: вращении вокруг центра кольца со скоростью ω_1 и прецессии центра кольца Ω в том же направлении. Уравнения траектории точек кольца имеет вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= R \sin \omega_1 t + \delta \sin \Omega t \\ y(t) &= R \cos \omega_1 t + \delta \cos \Omega t \end{aligned} \quad (1)$$

Скорость вращения кольца можно определить из следующих условий. Радиус кольца больше радиуса шайбы, поэтому за время полного оборота шайбы внутри кольца оно повернется вокруг своего центра на угол, равный $\beta = 2\pi(r/R)$. Следовательно, скорость вращения кольца ω_1 составит:

$$\omega_1 = \omega r/R \quad (2)$$

Уравнения (1) в случае прямой прецессии кольца описывают эпитрохоиды, количество петель которых n определяется отношением скорости вращения кольца к скорости прецессии его центра: $n = 1 + \omega_1/\Omega$.

При вращении ротора с большими скоростями необходимо проводить исследование динамических процессов с учетом гидродинамических сил в зазоре, а также сил сухого трения [10].

Экспериментальные траектории точек кольца при «обегании». При обработке экспериментальных данных возникли определенные трудности при фиксации положений точек кольца на траектории. Использование записывающих устройств приводило к введению дополнительного демпфирования между кольцом и диаграммой, что существенно искажало процесс обегания. Поэтому положение точки кольца отмечалось на диаграмме без контакта с кольцом при различных углах поворота рычага («ротора»). На каждом кадре фиксировалось

положение двух диаметрально расположенных точек кольца, что позволило определить также траекторию центра кольца и скорость его прецессии. Эти траектории при различных соотношениях между радиусами колец и шайбы при одном обороте шайбы приведены на рис.3. Траектории получены при одинаковых коэффициентах трения между кольцом и шайбой, а также между ними и средой, что позволило провести их сравнительный анализ.

На рис. 3, а, б, в представлены траектории точек колец в режиме обегания за один оборот шайбы, полученные на экспериментальной установке. Из (2), в частности, следует, что скорость вращения кольца меньше скорости вращения шайбы, и поэтому при вращении шайбы метки кольца будут отставать от метки шайбы, что и наблюдалось в наших экспериментах. При наличии проскальзывания скорость вращения кольца снижается.

Таким образом, прецессия центра кольца - прямая (в отличие от режима обкатки, когда прецессия обратная). Вследствие этого траектории точек кольца представляют собой эпитрохоиды.

В том случае, если радиусы кольца R и шайбы r близки между собой (рис. 3, а), траектории точек кольца представляют собой окружности радиуса r^* , что подтверждается соотношениями (1).

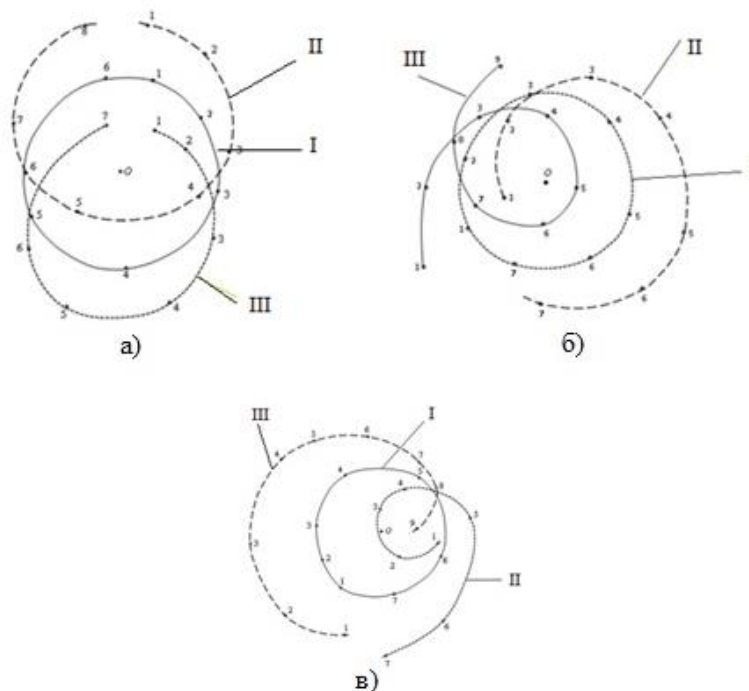


Рис. 3. Экспериментальные траектории точек кольца в режиме обегания: I – траектория центра кольца, II- III- траектории диаметрально противоположных точек кольца: а) $R/r=1,1$, б) $R/r=1,9$, в) $R/r=3,5$

Траектории рис. 3 получены при одинаковых коэффициентах трения между кольцом и шайбой, а также между ними и средой. Это позволяет провести сравнение скоростей вращения кольца и шайбы для различных соотношений их радиусов. Получены следующие отношения скорости вращения кольца ω_1 к его скорости прецессии Ω : а) при $R= 19$ мм:

$\omega_1/\Omega=1.6$ и траектория кольца –эпитрохоида с одной петлей (рис. 3, б), б) при $R= 30\text{мм}$: $\omega_1/\Omega = 2.7$ и траектория кольца –эпитрохоида с двумя петлями (рис. 3. в).

Выводы

- траектории точек кольца в роторных системах представляют собой эпитрохоиды, количество петель которых n определяется отношением скорости вращения кольца к скорости прецессии его центра;
- прецессия центра кольца- прямая (в отличие от режима обкатки, когда прецессия - обратная);
- траектория центра кольца представляет собой окружность, а скорость прецессии совпадает со скоростью вращения возбудителя колебаний (ротора)

Список литературы

1. Банах Л.Я. Некоторые явления, возникающие при движении вала в подшипнике с зазором//Машиноведение. – 1965. - № 1. - С.70-79. .
2. Блехман И.И. Вибрационная механика. - М.: Наука, 1994. - 398 с.
3. Banakh L. Contact problems in rotor systems //Vibroengineering. Procedia. - October 2016. - ISSN 2345-0533. - Vol. 8. - P. 90-96.
4. Shatochin V.F. Vibrations of turbogenerator rotors with rolling of rotor to stator. Modeling techniques and software tools. - Lap Lambert Academic Publishing, 2016. - 308 p.
5. Костюк А.Г., Шатохин В.Ф., Волоховская О.А. Особенности движения ротора с задеванием о статор // Теплоэнергетика . - 2013. - № 9. - С. 21-27.
6. Никифоров А.Н. Обобщенная математическая модель ротора Джеффкота-Лавалья с учетом проскальзывания при контактах и несоосности со статором //Вестник научно-технического развития. – 2012. - № 5(57)., С. 41-56.
7. Банах Л.Я., Никифоров А.Н. Снижение уровня вибрации быстроходных роторных систем при помощи плавающих уплотнительных колец //Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. - № 4. - С. 20-25.
8. Rozhdestvensky Yu, Boyarshinova A. and etc. Dynamics Analysis of Rotor with Floating Rings Package Bearing//8-th IFToMM Int.Conf. on Rotor Dynamics. - Seoul. Korea. - 2010.
9. Li. С.Н., Rohde S. M. On the Steady and Dynamic Performance Characteristics of Floating Ring Bearings //ASME Paper No 80-C2/Lub-17. 1980
10. Ахметханов Р.С., Банах Л.Я., Рудис М.А. Анализ нестационарных колебаний быстро-вращающихся роторных систем с учетом газодинамических сил //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2001. - № 6. - С. 16-22
11. Банах Л.Я., Бармина О.В., Кельнер М.С. Кинематика движений в роторной системе при контакте ротора с плавающими элементами //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2017. - № 4. - С. 26-30.
12. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. - Изд. АН СССР, 1959. - 247 с.

Дата поступления: 27 июня 2020 г.