

10-я Международная научно-техническая конференция "ТЕРВИКОН-2002"
Украина, Сумы, 10-13 сентября 2002 г.

НЕЛИНЕЙНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПОРНОГО СЕГМЕНТНОГО ПОДШИПНИКА (СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА)

NON-LINEAR HYDRODYNAMIC MODEL OF JOURNAL SEGMENTAL BEARING (STEADY-STATE PROBLEM)

САВОНЕНКО Василий Иванович, с.н.с.,
АО «НПО им. М.В. Фрунзе», г. Сумы, Украина.

Abstract. This paper presents non-linear hydrodynamic model of journal segmental bearings (steady-state problem). There is given algorithm for computation of steady-state characteristics and generalized dynamic factors (stiffness coefficient and damping factor). Packet of applied programs (FORTRAN-77/MS-DOS) is recommended to carry out hydrodynamic analysis of journal segmental bearings for high rotational speed centrifugal machines while their designing and performing start-up and adjustment works.

На этапах проектирования ЦМ и проведения пуско-наладочных работ часто возникает необходимость уточненного динамического анализа (ДА) роторных систем (РС) с учетом гидродинамического влияния (ГДМ - влияние) масляного клина (МК) опорных сегментных подшипников (ОСП), что приводит к необходимости совместного решения задач теории колебаний (ТК) и гидродинамики (ГДМ).

Таким образом построение ГДМ-модели ОСП - является актуальной задачей. В этом направлении выполнен большой объем экспериментальных и теоретических исследований [1...11].

Характерной особенностью ОСП является сведение циркуляционных сил (основной источник автоколебаний) на рабочих режимах к минимуму за счет подвижности вкладышей/сегментов, поэтому они считаются наиболее виброустойчивыми в широком диапазоне частот и нашли широкое применение в высокооборотных ЦМ (линейная скорость вала в ОСП достигает $U = 100$ м/с и более [4]).

В данной работе предлагается нелинейная ГДМ-модель ОСП (стационарная задача) на основе гипотезы "Вкладыши/сегменты являются аб-

солотно-жесткими (недеформируемыми), самоустанавливающимися, с центральным шарнирным опиранием" - см. рис. 1-а.

Основные уравнения ГДМ:

1) уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{V},$$

2) уравнения сплошности/неразрывности:

$$\text{div}(\vec{V}) = 0,$$

где: \vec{V} - вектор скорости жидкости; \vec{F} - вектор массовых сил жидкости; ρ - плотность жидкости; p - давление жидкости; ν - кинематическая вязкость жидкости; grad - оператор градиента; ∇^2 - оператор Лапласа; div - оператор дивергенции.

На основе следующих допущений-гипотез: $\nu = \text{const}$ - вязкая жидкость; $\rho = \text{const}$ - несжимаема жидкость; $T = \text{const}$ - изотермическая жидкость; $F = 0$ - массовые силы равны нулю; $\frac{d\vec{V}}{dt} = 0$ - силы инерции равны нулю, основные уравнения ГДМ могут быть преобразованы в фундаментальное уравнение Рейнольдса - основное уравнение ГДМ-теории смазки [1,3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \mu U \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \mu \frac{\partial h}{\partial t}$$

где: $h = h(x, z, t)$ - зазор/толщина МК; $p = p(x, z, t)$ - давления МК; μ - динамическая вязкость смазки; U - скорость относительного движения поверхностей скольжения; x, z - прямоугольные координаты; t - время.

Фундаментальное уравнение Рейнольдса устанавливает дифференциальную связь между параметрами зазора/толщины и давления МК. Решение его является интегральным с сильной нелинейностью (несущая способность имеет предельно-граничную сингулярность), нестационарным и представляет собой сложную и трудоемкую теоретическую задачу прикладной ГДМ.

При стационарных нагрузках ОСП может быть получено стационарное интегральное решение. В задачах ДА РС ЦМ на ОСП наибольший практический интерес представляют не только стационарные характеристики, но и обобщенные динамические коэффициенты (ОДК) в точке стационарного положения равновесия (ГДМ-жесткость и ГДМ-демпфирование).

Решение задачи сводится к 2-м основным этапам:

- 1) расчет точки стационарного положения равновесия ОСП;
- 2) расчет обобщенных динамических коэффициентов ОСП.

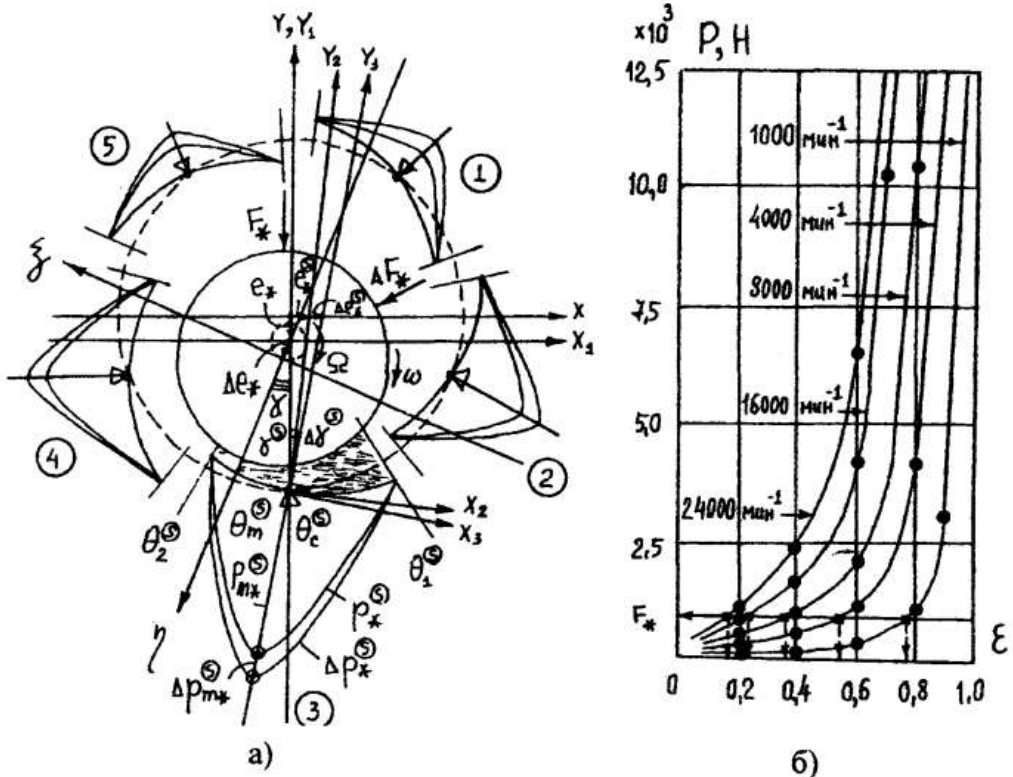


Рисунок 1 - Гидродинамическая модель опорного сегментного подшипника - стационарная задача и метод малых возмущений (а), стационарная силовая характеристика несущей способности (б).

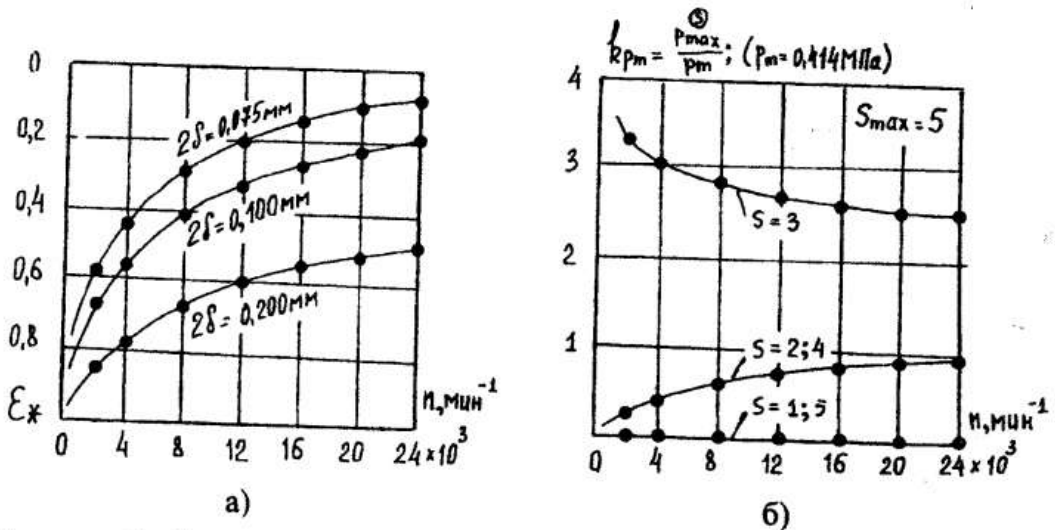


Рисунок 2 - Стационарные частотные характеристики относительного эксцентриситета вала (а) и максимальных давлений масляного клина сегментов (б) опорного сегментного подшипника.

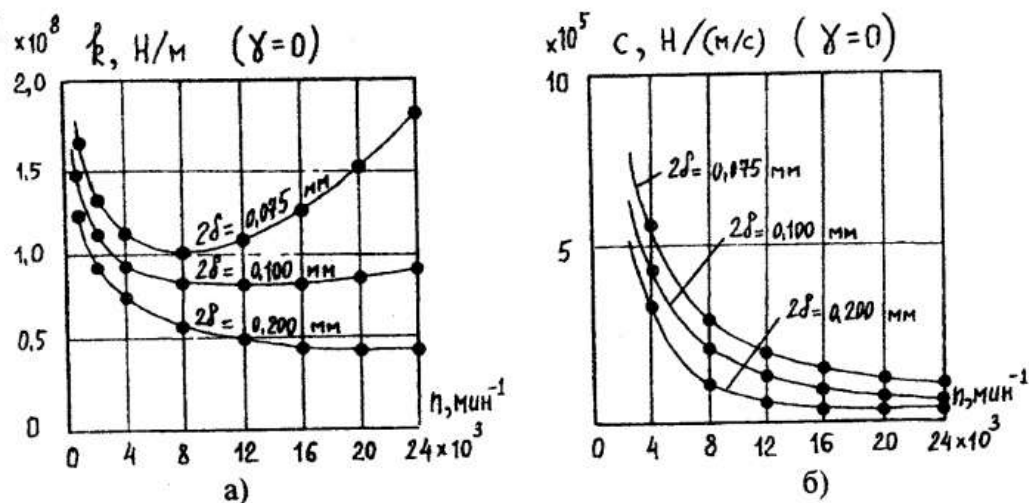


Рисунок 3 - Стационарные частотные характеристики обобщенных динамических коэффициентов опорного сегментного подшипника: ГДМ-жесткости (а) и ГДМ-демпфирования (б).

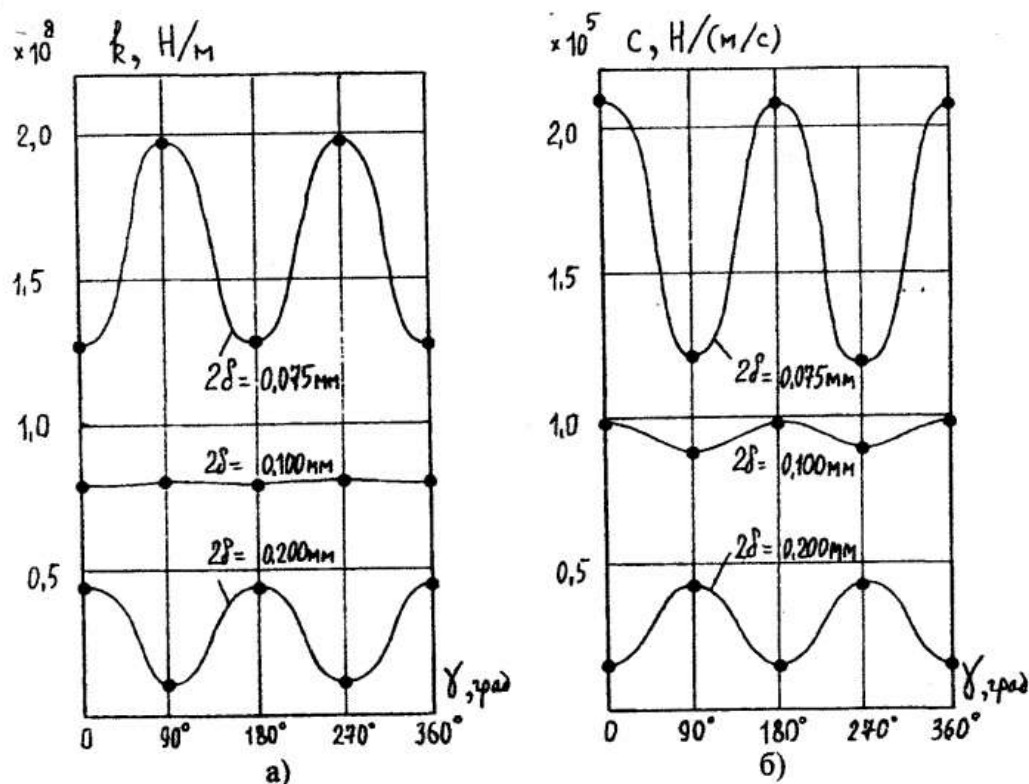


Рисунок 4 - Влияние угла возмущения и зазора на обобщенные динамические коэффициенты опорного сегментного подшипника: ГДМ-жесткость (а) и ГДМ-демпфирование (б).

1 ЭТАП. Расчет точки стационарного положения равновесия (СПР). Расчет сводится к решению стационарного уравнения Рейнольдса для МК ОСП (стационарная задача). С учетом дополнительных упрощающих гипотез для ОСП основная система уравнений ГДМ-теории смазки может быть приведена к виду:

$$L_1(p_*^s, h_*^s, \mu, \omega, R) = 0, \quad p_*^s(\theta_1^s) = p_*^s(\theta_2^s) = 0, \quad s = \overline{1, s_{max}}, \quad \bar{P} = \bar{F}_*,$$

где: L_1 - дифференциальный оператор Рейнольдса стационарной задачи; $h_*^s(\theta)$, $p_*^s(\theta)$ - стационарные зазор/толщина и давление МК сегмента; μ - динамическая вязкость смазки; ω - частота вращения вала (угловая скорость); R - радиус вала; s - номер сегмента; s_{max} - максимальное количество сегментов ОСП; θ_1^s, θ_2^s - начальный и конечный угол сегмента; P - стационарная несущая способность ОСП; F - стационарная внешняя нагрузка ОСП.

Обобщенный алгоритм расчета точки СПР:

- 1) построение геометрической модели ОСП в точке СПР;
- 2) определение геометрических параметров МК ОСП;
- 3) построение стационарного интегрального решения ОСП;
- 4) учет стационарных граничных условий ОСП;
- 5) определение стационарной несущей способности ОСП;
- 6) учет стационарного условия равновесия ОСП;
- 7) построение системы нелинейных уравнений порядка $N = S_{max} + 1$ (СНУ/ $N = S_{max} + 1$);
- 8) анализ и исследование свойств решений СНУ/ $N = S_{max} + 1$ и формирование условий взаимно-однозначного соответствия;
- 9) разработка численного метода решения СНУ/ $N = S_{max} + 1$ с учетом условий взаимно-однозначного соответствия;
- 10) получение численного решения стационарной задачи - точка СПР;
- 11) определение дополнительных стационарных характеристик ОСП.

Наибольший практический интерес представляют:

- 1) $P = f(\varepsilon)$ - стационарная силовая характеристика (СХ) несущей способности ОСП;
 - 2) $E = f(\omega)$ - стационарная частотная характеристика (ЧХ) относительно эксцентриситета ОСП;
 - 3) $p = f(\theta)$ - стационарное распределение давления МК сегментов,
- где $f(\dots)$ - функциональная зависимость; ε - относительный эксцентриситет; ω - частота вращения; θ - полярный угол.

2 ЭТАП. Расчет обобщенных динамических коэффициентов (ГДМ-жесткости (ГДМ-Ж) и ГДМ-демпфирования (ГДМ-Д)) в точке СПР ОСП. Расчет сводится к решению нестационарного уравнения Рейнольдса для МК ОСП, линеаризованного в точке СПР на основе метода малых возмущений (ММВ).

С учетом дополнительных упрощающих гипотез для ОСП основная система уравнений ГДМ-теории смазки на основе ММВ может быть приведена к виду:

$L_2(\Delta p_*^s, \Delta h_*^s, \mu, \omega, R, t) = 0, \Delta p_*^s(\theta_1^s) = \Delta p_*^s(\theta_2^s) = 0, s = \overline{1, s_{max}}, \overline{\Delta P} = \overline{\Delta F_*},$
 где: L_2 - дифференциальный оператор Рейнольдса нестационарной задачи, линеаризованной в точке СПР/ММВ; $\Delta p_*^s(\theta), \Delta h_*^s(\theta)$ - нестационарные дополнительные (ДП) параметры ММВ: ДП-зазор/толщина и ДП-давление МК сегмента; $\overline{\Delta P}$ - нестационарная ДП-несущая способность ММВ ОСП; $\overline{\Delta F_*}$ - нестационарная ДП-внешняя нагрузка ММВ ОСП.

Обобщенный алгоритм расчета ОДК:

- 1) построение геометрической модели ОСП в точке СПР/ММВ;
- 2) определение геометрических ДП-параметров МК ОСП;
- 3) построение нестационарного ДП-интегрального решения ОСП;
- 4) учет нестационарных ДП-граничных условий ОСП;
- 5) определение нестационарной ДП-несущей способности ОСП;
- 6) учет нестационарного ДП-условия равновесия ОСП;
- 7) формирование матричного уравнения связи ДП-силовых и кинематических параметров ММВ ОСП и определение обобщенных динамических коэффициентов ОСП (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) на основе гипотезы линейной независимости (ЛНЗ) кинематических параметров ММВ;
- 8) формирование матричного уравнения связи ДП-силовых и кинематических параметров ММВ ОСП и определение обобщенных динамических коэффициентов ОСП (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) на основе гипотезы линейной зависимости (ЛЗ) кинематических параметров ММВ и введения "обобщенной функции слежения" сегментов за движением вала при ММВ.

Наибольший практический интерес представляют:

- 1) $\{k, c\} = f(\omega)$ - стационарные ЧХ ОДК ОСП;
 - 2) $\{k, c\} = f(\gamma)$ - стационарные полярные характеристики (ПХ) ОДК ОСП,
- где ω - частота вращения; γ - полярный угол.

На основе вышеприведенных алгоритмов был разработан пакет прикладных программ (ППП) нелинейного ГДМ-анализа ОСП (язык программирования - ФОРТРАН-77/MS-DOS). Решение дифференциальных уравнений Рейнольдса МК ОСП, разработка алгоритмов и программ, отладка и тестирование представляют сложный и трудоемкий процесс. ППП позволяет определить и выявить основные количественные и качественные закономерности многопараметрического ГДМ-влияния на стационарные характеристики и ОДК ОСП.

На основе разработанного ППП был выполнен нелинейный ГДМ-анализ ОСП высокооборотной ЦМ. Результаты расчета:

- 1) стационарная СХ ОСП - см. рис. 1-б;
- 2) стационарная ЧХ относительного эксцентриситета ОСП - см. рис. 2-а;

- 3) стационарная ЧХ максимальных давления МК сегментов ОСП - см. рис. 2-б;
- 4) стационарные ЧХ ОДК (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) ОСП - см. рис. 3;
- 5) стационарные ПХ ОДК (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) ОСП - см. рис. 4.

Дополнительный функциональный анализ $CHY/N = S_{max} + I$ показал, что ненагруженными сегментами ОСП можно пренебречь. Стационарное распределение давлений МК сегментов ОСП является симметричным (в 1-м приближении), что хорошо согласуется с экспериментальными результатами [4]. Стационарные ОДК (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) имеют полярную анизотропию - см. рис. 4. Полученная информация представляет как научный, так и практический интерес.

Алгоритмы и программы рекомендуются для использования в соответствующих задачах ГДМ-анализа ОСП высокооборотных ЦМ на этапах проектирования и проведения пуско-наладочных работ.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. -Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов /Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. - М.: Машиностроение, 1980.-544с.
2. Тондл А. Динамика роторов турбоагрегатов. - Ленинград: Энергия, 1971. - 387с.
3. Шнепп В.Б. Конструирование и расчет ЦКМ. - М.: Машиностроение, 1995. - 240с.
4. Максимов В.А., Баткис Г.С. Трибология подшипников и уплотнений жидкостного трения высокоскоростных турбомашин. - Казань: Фэн, 1998. - 430с.
5. Марцинковский В.А. Гидродинамика и прочность центробежных насосов. - М.: Машиностроение, 1970. - 272с.
6. Симоновский В.И. Устойчивость и нелинейные колебания роторов ЦМ. - Харьков: Вища школа. Изд. ХГУ, 1986. - 128с.
7. Шульженко Н.Г. Исследование колебаний высокооборотных гибких роторов на подшипниках скольжения. Дис. канд.техн.наук. - Харьков: Изд. ХПИ, 1974.
8. Квитницкий Е.И., Киркач Н.Ф., Поплавский Ю.Д., Савин А.Ф. Расчет опорных подшипников скольжения: Справочник. - М.: Машиностроение, 1979. 70с.
9. Снеговский Ф.П. Расчет и конструирование подшипников скольжения. - Киев: Техника, 1974. - 100с.
10. Воскресенский В.А., Дьяков В.И., Зиле А.З. Расчет и проектирование опор жидкостного трения.: Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. - 232с. (Б-ка расчетчика).
11. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. Учебник для студентов вузов. - М.: Машиностроение, 1982. - 264с.