

**УДК 621.9.06.004.58****ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА КАК АСИММЕТРИЧНОГО РОТОРА**

Игорь Николаевич Лукашин, Лилия Олеговна Плаксина

*Студенты 6 курса**кафедра «Металлорежущие станки»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**Научный руководитель: А.Г. Шишов**ассистент кафедры МТ-1 «Металлорежущие станки»**Ключевые слова: шпиндельный узел, ротор, асимметрия жёсткости опор, диагностика, вибрационная диагностика.*

Динамические характеристики металлорежущего станка оказывают существенное влияние на точность и качество обработки поверхности. С течением времени эти характеристики ухудшаются из-за действия различных физических процессов, таких как трение, износ и др. Это приводит к снижению качества обработки поверхности, надёжности работы, а в некоторых случаях к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

В условиях роста сложности, точности и стоимости металлорежущих станков использование планово-предупредительного ремонта (ППР) приводит к затратам, сопоставимым со стоимостью самого оборудования. При этом график проведения ППР не связан с фактическим состоянием станка, и ремонт может проводиться для ещё работоспособного оборудования. В связи с этим в мире происходит переход от ППР к ремонту по фактическому состоянию.

Ремонт по фактическому состоянию требует непрерывного или регулярного наблюдения за физическим состоянием станка методами вибрационной диагностики. Использование вибродиагностики позволяет мониторить состояние станка в режиме реального времени без необходимости его частичной разборки. Качество диагностики и точность предсказания даты начала ремонта существенным образом зависят от возможностей используемых физико-математических моделей.

В ряде работ по вибродиагностическому анализу станком используется осесимметричная модель осесимметричного ротора [1-4]. В такой модели жесткостные, геометрические и инерционные характеристики симметричны относительно оси вала ротора. Применение подобных моделей не позволяет объяснить ряд физических явлений, например, появление дополнительных пиков на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) [4].

Наличие дополнительных пиков на АЧХ может быть объяснено только в рамках асимметричной модели ротора вследствие расщепления собственной частоты механической системы. Для анализа этого явления была построена модель вала ротора на подшипниковых опорах симметричной и асимметричной жёсткости (см. рис. 1). Моделирование было выполнено в среде JupyterLab 3 [5] на языке программирования Python 3.8 [6] с использованием библиотек NumPy и Matplotlib [7,8].

Для моделирования использовались следующие исходные данные:

- масса  $m = 86$  кг,
- момент инерции сечения относительно оси  $x$   $I_x = 3,4$  кг·м<sup>2</sup>,
- момент инерции сечения относительно оси  $y$   $I_y = 3,4$  кг·м<sup>2</sup>,
- жёсткость пружины  $k = 2,1 \cdot 10^9$  Н/м,
- коэффициент вязкого сопротивления  $c = 1,8 \cdot 10^5$  Н·с/м,

- длина  $l_1 = 0,01$  м,
- длина  $l_2 = 0,37$  м,
- длина  $l_3 = 0,18$  м,
- коэффициент модального демпфирования  $\xi = 0,005$ .

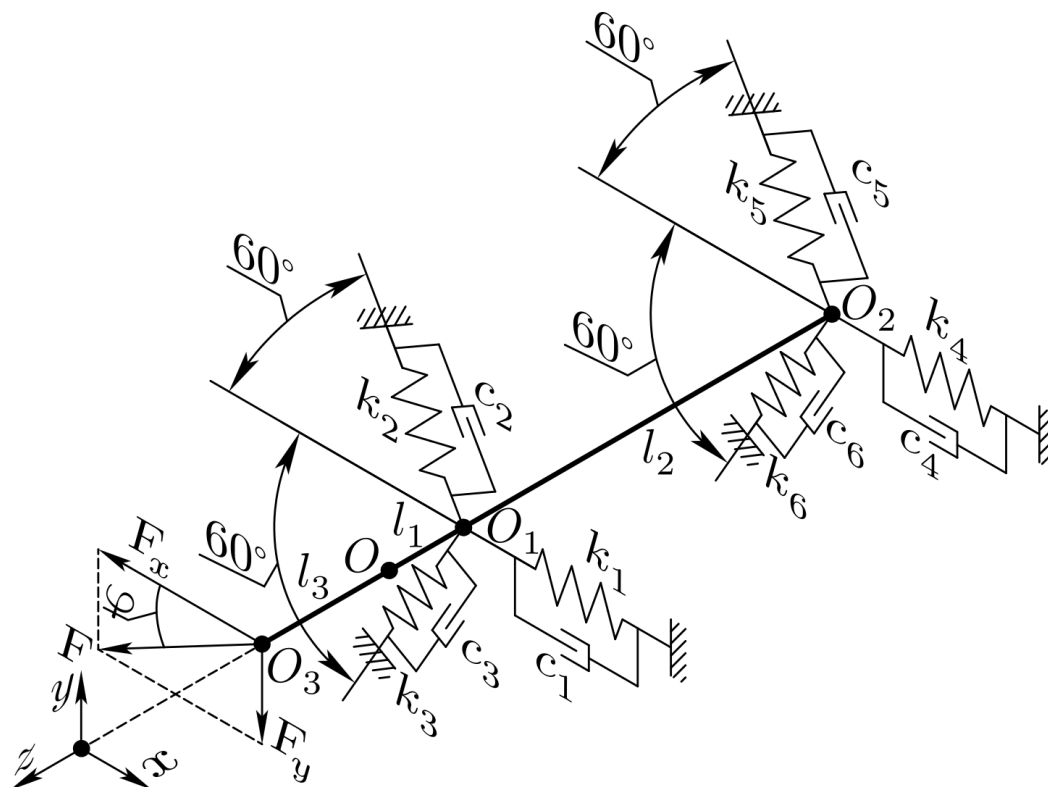


Рис. 1. Модель ротора как вала на ассиметричных опорах

Для моделирования динамики вала сначала аналитическими методами были составлены матрицы инерции  $[M]$  и жёсткости  $[K]$  для переднего конца (точки  $O_3$ ). Затем численными методами была решена задача о собственных значениях (функция `numpy.linalg.eig` [9]), после чего численным способом были построены АЧХ.

Было смоделировано:

- влияние степени асимметрии опор жёсткости вала на АЧХ,
- влияние угла поворота силы  $F$  на АЧХ при опорах ассиметричной жёсткости,
- влияние угла поворота опор ассиметричной жёсткости на АЧХ.

Расщепление частоты наблюдается при сопоставлении двух графиков: один – АЧХ, когда вход и выход по координате  $y$ , другой – АЧХ, когда вход и выход по координате  $z$ .

Моделирование показало следующее:

- Степень расщепления равномерно увеличивалась по мере возрастания степени асимметрии от 0% до 50% включительно. При асимметрии в 50% (жёсткости опор вала в горизонтальной и вертикальной плоскости различаются в 2 раза) расхождение частот составило 209 Гц.
- Вращение в плоскости  $xu$  приложенной к точке  $O_3$  внешней силы  $F$  не приводит к изменению степени расщепления частот, но приводит к изменению высоты пиков на АЧХ по гармоническому закону.
- Поворот опоры из трёх пружин вокруг оси вала не изменяет степень расщепления и приводит к циклическому изменению высот пиков на АЧХ.

Таким образом, моделирование показывает, что только учёт асимметрии жёсткости опор позволяет объяснить появление дополнительных пиков на экспериментальных АЧХ. Это означает, что для целей вибродиагностики нельзя использовать осесимметричные модели ротора.

В данной работе моделировалась только асимметрия жёсткости самих опор. Моделирование других форм асимметрии – геометрической (наличие трещины на валу) и инерционной (дисбаланс) в конечном итоге сводится к моделированию вала на опорах асимметричной жёсткости [10].

В некоторых работах [11] асимметрия и связанное с ней расщепление частот на АЧХ рассматривается как признак наличия дефекта. Однако моделирование доказывает, что асимметрия проявляется и при отсутствии дефектов в конструкции. Соответственно, сам факт расщепления частот является необходимым, но недостаточным условием существования дефекта.

Использование подобного моделирования позволяет выявлять закономерности влияния различных факторов (жёсткость подшипников, геометрия вала и т.д.) на АЧХ ротора [12]. Таким образом, результаты, полученные в результате данного моделирования, могут быть использованы в целях вибродиагностики с целью безразборной оценки фактических характеристик шпинделя.

## Литература

1. *Шитов А.М., Алёшин А.К., Кондратьев И.М., Щусев Д.В.* Комплексная методика диагностирования шпиндельных узлов станков // Научные труды IV Международной научной конференции (Москва, 24-25 ноября 2015 г) "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". Москва: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 271-273.
2. *Шитов А.М.* Диагностические методы и модели шпиндельных узлов станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 43-50.
3. *Федченко В.Ю., Федченко А.А., Бурьянов И.В., Маскайкина С.Е., Юфкин Ю.Г.* Исследование влияния типа опор качения на динамику шпиндельных узлов металлорежущих станков // В сборнике: Материалы XXIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Материалы конференции. В 3-х частях. 2019. С. 274-278
4. *Сабиров Ф.С., Боган А.Н., Михайлов И.С.* Исследование динамических характеристик шпиндельных узлов партии токарных станков с ЧПУ // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. 2020. С. 351-354.
5. *Jupyter Development Team (2020).* JupyterLab: a web-based interactive computing platform, that combines live code, equations, narrative text, visualization, interactive dashboards and other media. URL: <https://jupyter.org/>.
6. *Python Core Team (2020).* Python: A dynamic, open source programming language. Python Software Foundation. URL <https://www.python.org/>.
7. *Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al.* Array programming with NumPy. Nature 585, 357–362 (2020). DOI: 0.1038/s41586-020-2649-2, URL <https://numpy.org/>
8. J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment", Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007. URL: <https://matplotlib.org/>
9. Документация по функции eig решения задачи о собственных значениях из библиотеки численных расчётов Numpy. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.eig.html>

10. *Mariusz Czajkowski, Błażej Bartoszewicz, Zbigniew Kulesza* Modal analysis of a rotor with a cracked shaft // *Journal of Vibroengineering*, Vol. 19, Issue 1, 2017, p. 150-159.  
<https://doi.org/10.21595/jve.2016.16959>
11. *Востриков С.О., Молчанов А.А.* Анизотропия как диагностический признак дефекта шпиндельного узла // В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С. 5-9.
12. *Досько С.И., Молчанов А.А., Бренгауз А.Р. Быков П.А.* Модальная вибродиагностика конструкций токарных станков // *Вестник Брянского Государственного Технического Университета* №3 (51), 2016 г. стр. 184-190