

Ф. С. Сабилов, В. С. Хомяков, Д. Н. Сулов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИЛЬЗОВАННЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием шпиндельного узла гильзовой конструкции методом конечных элементов и программное обеспечение для реализации этого метода. Оценено влияние на динамические характеристики шпиндельного узла таких факторов, как наличие центрального отверстия в шпинделе, расположение опор, жесткость подшипников. *Шпиндельные узлы; моделирование ШУ; частотные характеристики ШУ; упругие деформации; динамические характеристики*

Достижение высоких показателей точности и производительности при работе станка зависит от многих факторов. Не последнюю роль в этом играют шпиндельные узлы (ШУ) – их конструкция, качество изготовления, сборки и регулировки. Одним из важных показателей качества ШУ являются его динамические характеристики [1–3]. Исследованиям динамических характеристик станков и их ШУ на упругих опорах посвящено значительное количество работ, например [4–9].

Моделирование шпиндельных узлов позволяет решать не только задачи оптимизации конструкции, но, в некоторых случаях, решать обратную задачу – производить оценку жесткости опор, то есть фактическую величину предварительного натяга (при наличии экспериментальных динамических характеристик), а на этой основе оценивать состояние опор, качество их регулировки [10].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Одной из программ, позволяющей моделировать шпиндельные узлы, является SpinDyna (версии 2.3) [9, 10], разработанная в МГТУ «Станкин» и предназначенная для автоматизированного расчета статических и динамических характеристик шпиндельных узлов металлорежущих станков. Опыт эксплуатации этой программы показал, что с ее помощью не удается адекватно моделировать шпиндельные узлы гильзовой конструкции, а также длинные тонкие втулки, сидящие на шпинделе, например, ротор мотор-шпинделя. Для решения подобных задач была разработана программа SpinDyna_FE, в основе которой лежит метод конечных элементов в отличие от SpinDyna (версии 2.3), использующей метод начальных параметров.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

Интерфейс обеих программ в основном одинаков. Отличие состоит в отображении гильзовой части шпиндельного узла. Кроме того, в новой программе появилась возможность на одном графике отображать частотные характеристики и формы колебаний для различных вариантов расчетной модели.

С помощью программы SpinDyna_FE можно моделировать ШУ металлорежущих станков на различных опорах (качения, аэро- и гидростатических и других) при наличии параметров, характеризующих их жесткостные и демпфирующие свойства.

Результатом статического расчета ШУ являются:

- осевые и радиальные упругие деформации, а также углы поворота сечений шпинделя, соответствующие узловым точкам расчетной схемы от заданных нагрузок и (или) веса шпинделя;
- реакции в опорах ШУ и стыках.

При динамическом расчете ШУ определяются:

- собственные частоты и модальные коэффициенты демпфирования;
- изгибные формы колебаний упругой системы ШУ в заданном частотном диапазоне;
- амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные характеристики ШУ по любой заданной координате, как от силы резания, так и от силы (момента), приложенной в любой узловой точке расчетной схемы.

Модальные параметры ШУ (собственные частоты, модальные коэффициенты демпфирования, нормальные формы колебаний) могут быть использованы для:

- получения реакции на произвольное силовое воздействие;

- анализа влияния на амплитуду колебаний отдельно жесткостных и демпфирующих характеристик;
- сопоставления с аналогичными характеристиками, получаемыми в результате обработки экспериментальных частотных характеристик.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИЛЬЗОВАННОГО ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА

Одним из примеров использования программы SpinDyna_FE, является работа, посвященная улучшению конструкции шпиндельного узла пятикоординатного шлифовального станка с ЧПУ. Сам шпиндель смонтирован внутри гильзы на пяти радиально-упорных подшипниках качения. Наружный диаметр гильзы 179 мм, а общая длина ШУ – 832 мм. В станке гильза со шпинделем размещена внутри бабки.

Исследуемый ШУ некоторое время уже находился в опытной эксплуатации, затем был снят со станка для некоторой доработки с целью улучшения динамических характеристик путем допустимых изменений конструкции. На рис. 1 показан ШУ, установленный на стенде и закрепленный в тех же местах, что и на станке. Попутно проводились исследования состояния

опор по виброакустическому сигналу, аналогичные исследования [11].



Рис. 1. Общий вид шпиндельного узла, установленного на стенде

Расчетная модель ШУ и окно программы с параметрами модели представлены на рис. 2. Пружины, обозначающие опоры, стоят по центру подшипников. Их жесткости взяты из каталога, а коэффициенты демпфирования, приняты в соответствии с рекомендациями [12].

Вариант модели : Шлифовальный станок вар 2

Таблица Эскиз Расчет Выход

Элементы: Нагрузка Стык Общие Пролет Опора Масса

Модуль упругости материала, Н/м²: 2e11

Плотность, кг/м³: 7850

К-т упругого демпфирования материал: 0.02

Изменить для всех пролетов

Общая длина шпинделя, мм: 850

Наибольший диаметр, мм: 220

Загрузить параметры

Исум, мм: 832

# эл.	Тип	Днар, мм	Двн, мм	L, мм	EI, Н*м ² Хцт.мм	m, кг/м М, кг	Iy, кг*м ²	Судан /ммк	Cti дан*м/ри	Сила, Н	Гамме Пси
1	Про...	70	0	85	2.36E05	3.02E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
2	Про...	80	0	13	4.02E05	3.94E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
3	Мас...	105	80	18	0.00E00	5.13E...	2.25E-03	0.00E00	0.00E00	0	0
4	Про...	80	0	36	4.02E05	3.94E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
5	Опора	125	80	22	0.00E00	0.00E00	0.00E00	3.64E01	7.00E03	0	0
6	Про...	80	0	66	4.02E05	3.94E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
7	Опора	125	80	22	0.00E00	0.00E00	0.00E00	3.64E01	7.00E03	0	0
8	Про...	80	0	11	4.02E05	3.94E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
9	Про...	87	0	290	5.62E05	4.66E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
10	Про...	90	0	14	6.44E05	4.99E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02
11	Мас...	120	90	20	0.00E00	7.76E...	4.39E-03	0.00E00	0.00E00	0	0
12	Про...	90	0	22	6.44E05	4.99E01	0.00E00	0.00E00	0.00E00	0	0.02

Рис. 2. Рабочее окно программы и расчетная модель шпиндельного узла (SpinDyna_FE)

Идентификация параметров исходной модели проводилась на основе частотных характеристик, полученных экспериментальным путем при импульсном нагружении шпинделя на переднем конце с помощью динамометрического молотка [13]. В результате идентификации удалось добиться весьма хорошего совпадения экспериментальных и расчетных собственных частот и высот пиков (АЧХ) в частотном диапазоне 0–1700 Гц, выбранном для дальнейшего анализа.

В шпиндельных узлах гильзовой конструкции шпиндель и гильза работают параллельно, внося свой вклад в перемещение переднего конца шпинделя. Анализ статических деформаций базового варианта показал, что перемещение переднего конца шпинделя зависит не только от

собственных деформаций тела шпинделя и деформаций опор. В значительной степени оно определяется подсистемой гильзы, причем, в основном, опорами гильзы.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ШПИНДЕЛЬНОМ УЗЛЕ

Наличие адекватной математической модели ШУ позволило начать поиск вариантов с улучшенными динамическими характеристиками ШУ, которые могут быть реализованы конструктивно. Варьировались положения подшипников в передней и задней опорах (рис. 3), жесткостные характеристики подшипников качения, а также конструктивные изменения в виде сквозного отверстия в шпинделе.

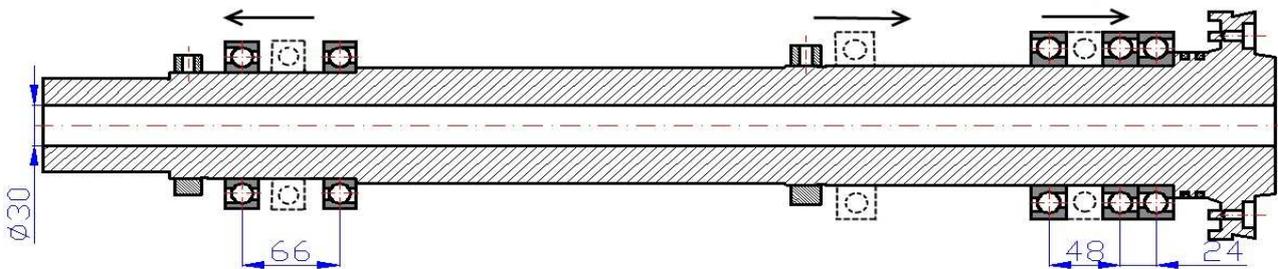


Рис. 3. Исходная модель шпинделя (пунктирные линии) и модель с улучшенными характеристиками (основная линия)

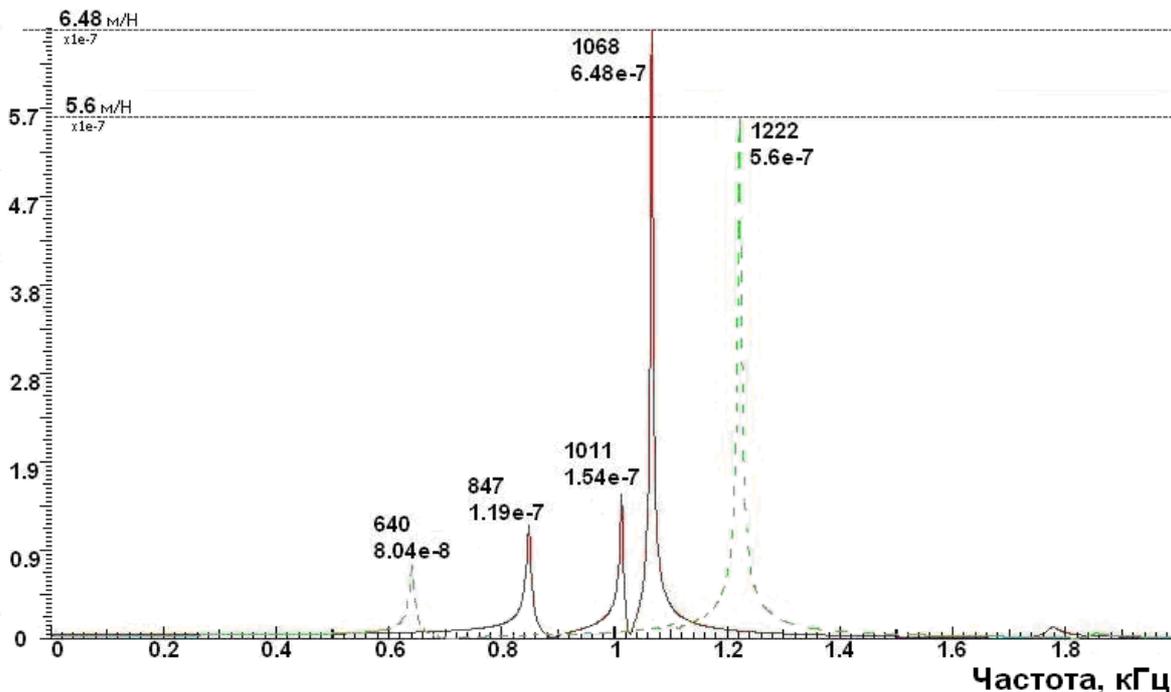


Рис. 4. АЧХ исходного (сплошные линии) и улучшенного варианта (пунктирные линии) моделей ШУ

На рис. 4 представлены расчетные АЧХ исходного варианта ШУ и улучшенного варианта. Видно, что вместо трех собственных частот стало две, частота максимального пика увеличилась с 1068 до 1222 Гц, а амплитуда уменьшилась на 15 %. Все это положительно сказывается на виброустойчивости ШУ. Однако недостатком улучшенного варианта является то, что понизилась частота первой формы колебаний с 847 до 640 Гц. Но это не должно вызывать опасений, поскольку амплитуда стала ниже.

Наличие отверстия диаметром 30 мм в шпинделе существенного влияния на собственные частоты и резонансные амплитуды по сравнению со сплошным шпинделем не оказывает.

ВЫВОДЫ

Разработанный программный комплекс SpinDyna_FE позволяет моделировать гильзованные шпиндельные узлы и рассчитывать их частотные характеристики и формы колебаний методом конечных элементов. Использование программного комплекса при моделировании шпиндельного узла шлифовального станка позволило оценить различные варианты конструктивных изменений, оценить влияние жесткостных характеристик опор, которые зависят от предварительного натяга в подшипниках, предложить вариант конструкции с улучшенными динамическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. **Бржозовский Б. М.** Стабилизация динамического состояния станка как основа решения задач повышения точности механической обработки деталей // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 3, № 1. С. 61–70.
3. **Жиганов В. И.** Методика определения технического уровня и качества прецизионных токарных станков на основе динамических показателей // СТИН. 2008. № 3. С. 2–5.
4. **Усакин К. С.** Моделирование динамического состояния шпиндельного узла прецизионного токарного модуля // Вестник Саратовского государственного

технического университета. 2010. Т. 2, № 1. С. 89–97.

5. **Щетинин В. С.** Математическая модель расчета несущей способности высокоскоростного шпиндельного узла на газомангнитной опоре // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. №8. С. 31–35.

6. **Поляков А. Н.** Реализация параметрических моделей в инженерном анализе металлорежущих станков // Технология машиностроения. 2007. № 6. С. 20–23.

7. **Игнатъев А. А.** Оценка динамического состояния шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний для оптимизации режимов обработки // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 4(33). С. 91–95.

8. **Кадыров Р. Р.** Метод анализа точности металлообрабатывающих станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 3 (11). С. 30–34.

9. **Сабиров Ф. С.** Диагностика, моделирование и расчет шпиндельных узлов станков // Комплект: ИТО. 2009. № 3. С. 52–54.

10. **Хомяков В. С.** Моделирование и расчет динамических характеристик шпиндельных узлов // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2(30). С. 76–82.

11. **Козочкин М. П.** Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки // СТИН. 2010. № 6. С. 17–21.

12. **Хомяков В. С.** Об учете демпфирования при динамических расчетах станков // Станки и инструмент. 1990. № 11. С. 4–7.

13. **Сабиров Ф. С.** Импульсный метод оценки динамических характеристик упругих систем станков // Инженерный журнал. 2009. № 11. С. 38–43.

ОБ АВТОРАХ

Сабиров Фан Сагирович, зав. каф. станков МГТУ «Станкин». Дипл. инженер-механик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (МГТУ «Станкин», 2009).

Хомяков Вадим Сергеевич, проф. той же каф. Дипл. инженер-механик (МосСТАНКИН, 1956). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (МосСТАНКИН, 1986).

Суслов Денис Николаевич, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (МГТУ «Станкин», 2009).