

УДК 621.01: 62-883

В. Е. Брешев, д-р техн. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганская Народная Республика, Россия

Тел./Факс: +79591596616, E-mail: veb_lug@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОШПИНДЕЛЯ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ КОНИЧЕСКИХ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

В статье представлены методика проведения и результаты вычислительных экспериментов, выполненных в среде САПР (CAD/CAE) по исследованию характеристик высокоскоростного пневмошпинделя новой конструкции – на регулируемых конических аэростатических опорах. Шпиндель предназначен для высокоскоростной и высокопроизводительной механической обработки металлов и монокристаллов. Его основным техническим преимуществом является регулируемость статических и динамических характеристик в процессе эксплуатации для точной настройки под требования техпроцесса обработки, что повышает её качество и производительность. В компьютерных вычислительных экспериментах исследуются интегральные статические характеристики – несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха и динамические – собственные частоты колебаний, амплитуды вынужденных колебаний и реакции на дисбаланс, на их основе проверяется эффективность предложенной модернизации.

Ключевые слова: шпиндель, коническая аэростатическая опора, интегральные характеристики.

V. E. Breshev

COMPUTATIONAL EXPERIMENTS TO STUDY CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC SPINDLE ON ADJUSTABLE CONICAL AIR STATIC SUPPORTS

The article presents the methodology for conducting and the results of computational experiments performed in the CAD environment (CAD / CAE) to study the characteristics of a high-speed pneumatic spindle of a new design - on adjustable conical aerostatic supports. The spindle is designed for high-speed and high-performance machining of metals and single crystals. Its main technical advantage is the controllability of static and dynamic characteristics during operation for fine tuning to the requirements of the processing technology, which increases its quality and productivity. In computer computational experiments, the integral static characteristics - bearing capacity, stiffness, process air consumption and dynamic - natural oscillation frequencies, amplitudes of forced oscillations and responses to unbalance are investigated, on their basis the effectiveness of the proposed modernization is checked.

Keywords: spindle, conical aerostatic support, integral characteristics.

1. Введение

В современном общем машиностроении и станкостроении интенсивно внедряются технологии и оборудование высокоскоростной и высокопроизводительной механической обработки материалов. Наиболее широкое применение она получила в аэрокосмической отрасли – при производстве лопастей турбин, деталей и корпусов турбокомпрессоров; в медицине – при производстве механизмов приборов, имплантатов и хирургического инструмента; в автомобильной промышленности – при производстве блоков цилиндров, трансмиссии и турбокомпрессоров; в химической промышленности и газодобывающей отрасли – при производстве пресс-форм и штампов для литья пластмасс под давлением и штамповки изделий из металла, изготовления рабочих колёс детандеров и компрессоров [1]. При высокоскоростной механообработке (ВСО) материалов происходит увеличение скорости резания в 5-10 раз – до 200 м/с и подачи – до

15 000 мм/мин.

ВСО характеризуется уменьшением сил резания, создающих момент сопротивления и изгибающие силы на валу, что связано со снижением коэффициентов трения и уменьшением сечения стружки. Наряду с увеличением отводимого тепла со стружкой (до 75%) и уменьшением до 5 % теплового потока в заготовку, перечисленные факторы создают условия для снижения температуры обрабатываемой поверхности детали и повышения качества механической обработки до уровня шлифования при общем росте производительности в 1,5-3 раза.

Для качественной реализации техпроцесса ВСО необходимо обеспечить:

1. Высокие частоты вращения ($n = 15\ 000 \dots 150\ 000$ об/мин), обеспечивающие высокие скорости резания – до 200 м/с.
2. Микрометрическую жёсткость мест установки инструмента – до 1000 Н/мкм, а при обработке малоразмерных деталей – не менее 10...80 Н/мкм, чтобы при этом уход инструмента от сил резания не превышал 0,3 мкм.
3. Точность позиционирования ротора до 1...2 мкм.
4. Вращающий момент и несущую способность, значительно превышающие моменты и силы, возникающие при механической обработке.
5. Динамическую устойчивость при переходных режимах, разгоне и прохождении критических частот. Разнесение собственных частот с частотами возмущающих сил и колебаний в системе «инструмент – заготовка».
6. Максимальную регулируемость оборудования – по частоте вращения, собственным частотам, жёсткости, несущей способности – для точной подстройки под условия (параметры) высокоскоростной механообработки [2].

В ЛГУ им. В. Даля разработан и изготовлен экспериментальный образец высокоскоростного пневмошпинделя новой конструкции – на регулируемых конических аэростатических опорах, который отвечает всем вышеперечисленным условиям качественной реализации ВСО. Аэростатические опоры конической формы позволяют создать опорную систему шпинделя только на двух подшипниках вместо четырёх, и, самое важное, впервые сделать опорную систему регулируемой и настраиваемой в процессе эксплуатации. Изменением величины зазора с воздушной смазкой в широких диапазонах регулируются основные характеристики шпинделя – жёсткость, несущая способность, собственные частоты колебаний, максимальная рабочая частота вращения [2, 3, 4]. Это даёт возможность точно настраивать пневмошпиндель под требования технологического процесса высокоскоростной механической обработки.

Для исследования характеристик пневмошпинделя, диапазонов их регулирования и эффективности его модернизации были разработаны методики, алгоритмы и применялись: экспериментальные натурные исследования; аналитический метод расчёта характеристик на основе математической модели; вычислительные компьютерные эксперименты в среде программ инженерного анализа методом конечных элементов (МКЭ). Все методы показали хорошую сходимость между собой при исследованиях статических и динамических характеристик, а также эффективность предложенной конструкции высокоскоростного пневмошпинделя и модернизации его опоры. Данная работа посвящена исследованию характеристик пневмошпинделя постановкой компьютерных вычислительных экспериментов в среде САПР (CAD/CAE) на основе его 3D-модели.

2. Постановка задачи

Разработка шпинделей для механической и, особенно, высокоскоростной механической обработки ориентирована на достижение необходимого уровня их выходных

параметров и интегральных характеристик – жёсткости, несущей способности, диапазона реализуемых частот вращения, собственных частот колебаний, амплитуд вынужденных колебаний ротора и точности его позиционирования с инструментом. Компьютерные вычислительные эксперименты разделены на два блока: исследование статических интегральных характеристик (несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха); исследование динамических характеристик (собственные частоты вращения, амплитуды вынужденных колебаний, отклики на вводимый дисбаланс). При этом, точность позиционирования и диапазон реализуемых частот вращения определяется сочетанием статических и динамических характеристик в заданных условиях эксплуатации пневмошпинделя.

Целью работы является исследование статических и динамических характеристик пневмошпинделя, диапазонов их регулирования постановкой серий вычислительных компьютерных экспериментов в программах инженерного анализа САПР.

Объектом исследований является пневмошпиндель на двух различных по конструкции и размерам конических аэростатических опорах, предназначенный для высокоскоростной механической обработки металлов и монокристаллов (рис. 1.).

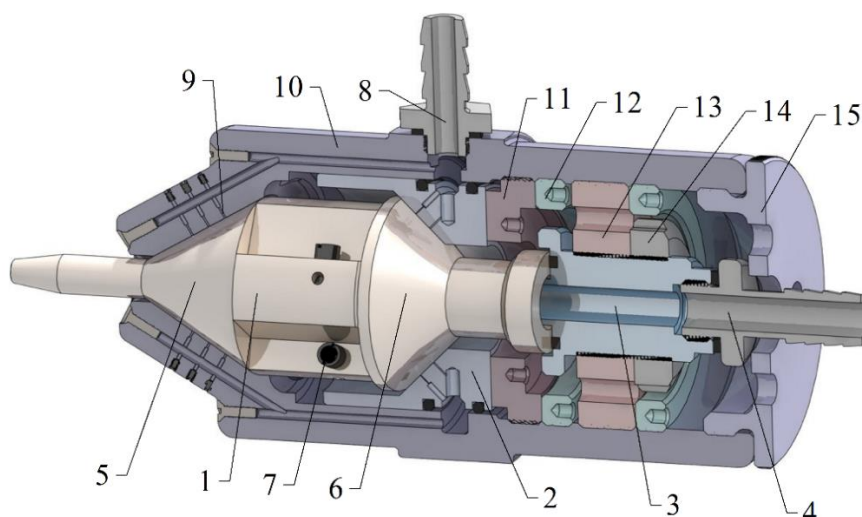


Рис. 1. Модель пневмошпинделя в разрезе: 1 – ротор с турбиной; 2 – подпятник; 3 – втулка; 4, 8 – штуцера для подачи воздуха; 5, 6 – радиально-упорные конические аэростатические опоры (левая и правая соответственно); 7 – сопла Лавала газовой турбины; 9 – ограничители расхода воздуха (питатели); 10 – корпус; 11, 12 – прижимное и стопорное кольца; 13, 14 – регулировочная и стопорная гайки; 15 – крышка

3. Последовательность и содержание вычислительных экспериментов по исследованию характеристик регулируемого пневмошпинделя на конических аэростатических опорах

На первом этапе исследовались статические характеристики пневмошпинделя. Компьютерные вычислительные эксперименты выполняются на основе трёхмерной модели в программах CAD/CAE и CFD, таких как FlowVision, FloWorks методом конечных элементов. Необходимо отметить, что выверенного и надёжного алгоритма расчёта конических аэростатических опор не существовало. В процессе его разработки была создана точная 3D-модель пневмошпинделя с полной детализацией конструкции конических опор (см. рис.1.), в ходе априорного анализа получено максимально досто-

верное представление о происходящих газодинамических процессах течения воздушной смазки в зазоре и приближённо определены ожидаемые результаты вычислений [4, 5]. Затем было выполнено планирование вычислительных экспериментов (по аналогии с натурными экспериментами), так как они являются многофакторными и, с учётом варьирования настроек программы газодинамического анализа, полный массив вариантов вычислений составляет свыше пяти миллионов.

Для оценки достоверности исследований были получены аналогичные результаты аналитическим методом и в ходе натуральных экспериментальных исследований пневмошпинделя в лабораторных условиях.

Были определены следующие основные требования к вычислительной процедуре и результатам компьютерных вычислительных экспериментов при численном определении интегральных характеристик шпинделя и его аэростатических опор:

- уровень достоверности количественной информации – не менее 85 % (погрешность в сравнении с другими методами получения количественной информации не должна превышать 15 %);
- уровень чувствительности расчётной модели по давлению подачи воздушной смазки – не ниже 0,05 атм.;
- уровень чувствительности по эксцентриситету e не ниже 2 мкм;
- параметрическая повторяемость в серии одинаковых вычислений не менее 98 %.

Вычислительные эксперименты выполнялись для каждой из опор и всего пневмошпинделя, как при отсутствии нагрузки (эксцентриситет $e = 0$ мкм), так и при варьировании радиальной и осевой нагрузок ($e \neq 0$ мкм) и давления подачи воздушной смазки.

Увеличение нагрузки на опору осуществлялось за счёт ступенчатого изменения эксцентриситета e ротора с малым шагом ($\Delta e = 2 \dots 5$ мкм) в радиальном или осевом направлениях. Конструктивно точная 3D-модель пневмошпинделя определила проточную часть (питатели и зазор) для воздушной смазки, которые составляют расчётную область – сетку. Установлены термодинамические параметры газовой смазки (вязкость, температура, скорость или давление) на входе и давление на выходе из расчётной области. Параметры расчётной сетки определены пробными вычислениями. Установлено, что наиболее рациональной, с точки зрения использования ресурсов вычислительной машины и получаемой точности результатов расчёта, является установка точности сетки на уровне 80 %. На рис. 2. показана сгенерированная в программе CFD сетка расчётного объёма всей опорной системы пневмошпинделя с общим количеством элементов 69294.

Определены начальные и граничные условия вычислительных экспериментов:

- среда – воздушная смазка;
- температура воздушной смазки – +20 °С;
- давление на входе в ограничители расхода (питатели) опор – 401325 ... 601325 Па;
- давление на выходе из зазоров конических опор – 101325 Па;
- интенсивность турбулентности – 2 % (поток воздушной смазки в целом считается ламинарным, что и является расчётным случаем, а области турбулентности носят локальный характер);
- поверхностям конических опор внутри зазоров присвоена шероховатость в 0,6 мкм.

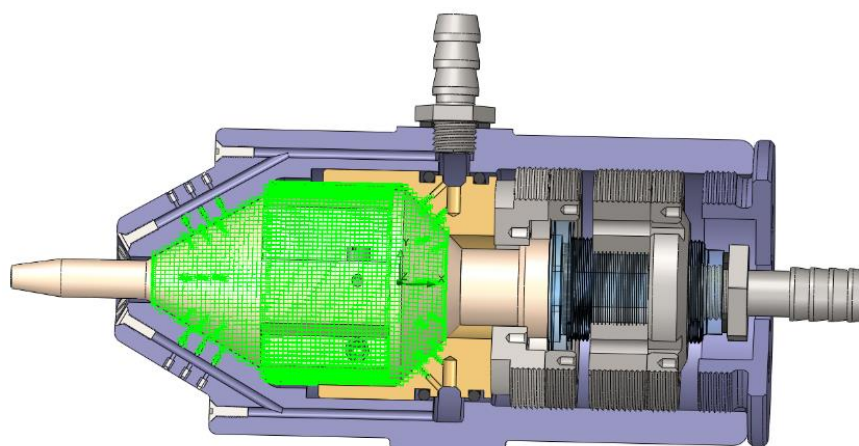


Рисунок 2. 3D-модель пневмошпинделя в разрезе с расчётной сеткой

Вычислительные эксперименты для каждого значения факторов (при неизменных условиях и настройках программы CFD), выполнялись многократно. Затем полученная выборка результатов данной интегральной характеристики проходила статистическую обработку, а среднее арифметическое полученной выборки результатов принималось за действительное расчётное значение для данных граничных и начальных условий. При построении графических зависимостей интегральных характеристик от варьируемых параметров каждое действительное расчётное значение становилось точкой-маркёром. По полученным точкам строились кривые функциональных зависимостей.

На рис. 3 показаны графики зависимости максимальной (при относительном эксцентриситете $\varepsilon=0,9$) радиальной подъёмной силы W_{eky} для правой опоры пневмошпинделя в исходном (ИО) и модернизированном (МО) вариантах её конструкции от величины среднего зазора C при варьировании давления подачи воздушной смазки p_s .

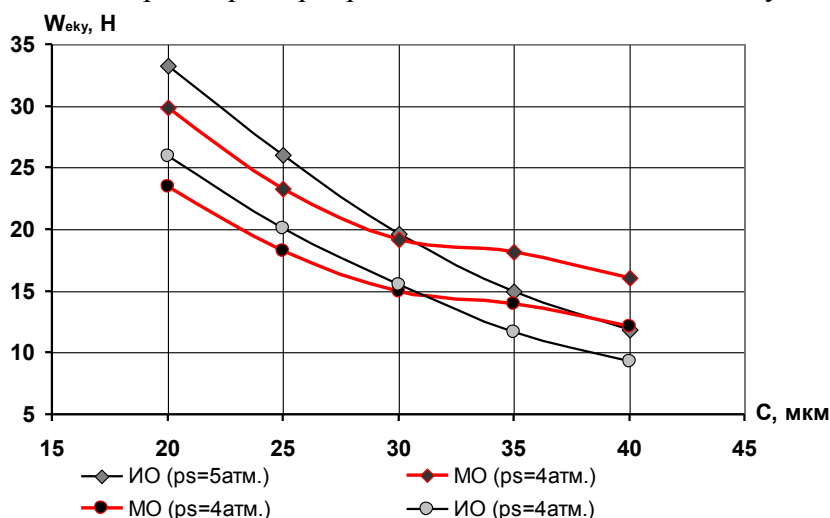


Рисунок 3. Зависимость радиальной подъёмной силы W_{eky} правой опоры от величины зазора C при варьировании давления подачи воздушной смазки p_s

Модернизация правой опоры заключалась в раззенковке её питателей и создании внутри зазора колец лабиринтного уплотнения, что привело к повышению жёсткости и несущей способности не только правой опоры, но и левой, а также всего пневмошпин-

деля [5]

Приведенные на рис. 3. зависимости показывают не только функциональную связь между максимальной подъёмной силой (несущей способностью) W_{eky} и величиной зазора C , но и диапазон регулирования W_{eky} в пневмошпинделе, так как расчётные значения C соответствуют действительному диапазону их регулирования на экспериментальном образце. Видно, что влияние установленных прямоточных лабиринтов на радиальную несущую способность проявляется при средних рабочих зазорах правой опоры, т.е. свыше 30 мкм [5].

Результаты компьютерных расчётов осевой K_{ZKP}^e и радиальной K_{XKP}^e жёсткостей правой конической азростатической опоры при варьировании величины среднего зазора C для давлений подачи технологического воздуха 4 атм. и 5 атм. показаны на рис. 4.

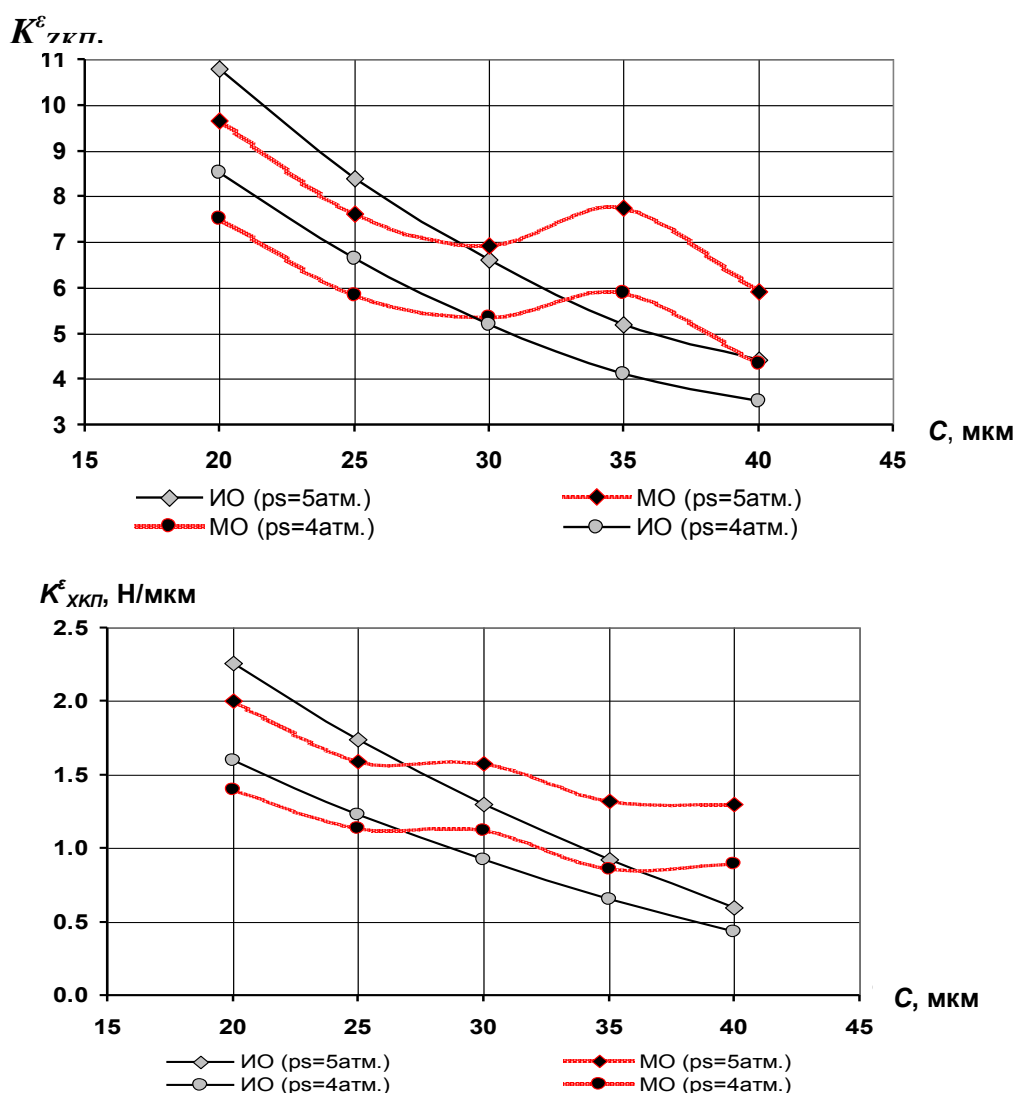


Рисунок 4. Осевая (а) и радиальная (б) жёсткости правой опоры в зависимости от зазора

Полученные в вычислительном эксперименте зависимости для осевой K_{ZKP}^e и радиальной K_{XKP}^e жёсткостей показали:

- уменьшение градиента жёсткости у модернизированной правой опоры от величины среднего зазора C с воздушной смазкой;
- расчётную регулируемость по осевой $K_{ЗКП}^c$ и радиальной $K_{ХКП}^c$ жёсткостям правой опоры на уровне 45-50 % от средних значений при изменении её среднего зазора C .

Для левой опоры пневмошпинделя были получены аналогичные зависимости с учётом увеличения значений её несущей способности и жёсткости в 1,5-2 раза. При этом в ходе вычислительных экспериментов в каждом расчётном случае определялся расход технологического воздуха через опоры как интегральная характеристика, показывающая эксплуатационные затраты и эффективность принимаемых технических решений [4, 5].

Наряду с вышесказанным, компьютерный вычислительный эксперимент позволил получить общую картину распределения газодинамических параметров в зазоре конических аэростатических опор, направления потоков воздушной смазки. Особенно важно детально проанализировать поле давлений в «смазочном конусе», получить расчётную информацию в любой точке зазора, несмотря на то, что его толщина составляет от 2 до 80 мкм в различных секторах при эксцентриситетах, вызванных внешними нагрузками.

На рис. 5 показаны принцип действия опорной системы пневмошпинделя, нагрузки, ротор экспериментального образца и результаты вычислительного эксперимента в виде «смазочных конусов», показывающих поле давлений воздушной смазки в правой и левой аэростатических опорах при действии радиальной нагрузки.

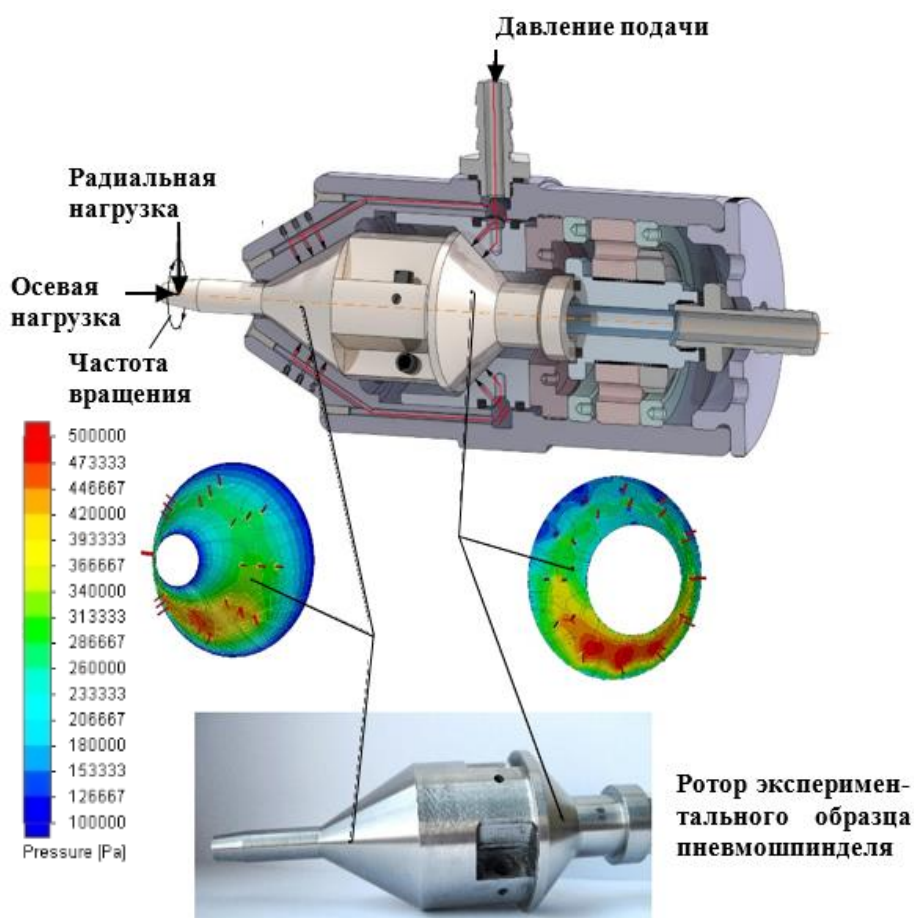


Рисунок 5. Модель, нагрузки, результаты расчёта и ротор пневмошпинделя

Расчёты показали, что если до модернизации правой опоры радиальная несущая способность пневмошпинделя составляла 60 Н, то после – 71 Н (+ 18.5 %). При этом, за счёт перераспределения величин зазоров, расход технологического воздуха правой модернизированной опоры увеличился с 2,02 м³/ч до 2,70 м³/ч, а левой – уменьшился с 3,5 м³/ч до 1,8 м³/ч, расход воздуха всего пневмошпинделя сократился на 1,02 м³/ч (на 38 %).

На следующем этапе вычислительными экспериментами были исследованы динамические характеристики пневмошпинделя. Расчётная модель вычислительных экспериментов построена на основе твердотельной модели пневмошпинделя, в которой воздушная смазка заменена пружинами с близкими к ней упругими (в соответствии с рассчитанными ранее жёсткостями конических аэростатических опор) и демпфирующими свойствами. Компьютерные расчёты выполнялись с использованием уравнений роторной динамики, которые в матричной форме имеют вид [6]:

$$[M][\ddot{U}] + ([b] + [G])[\dot{U}] + ([K] + [B])[U] = [F],$$

где M , b и K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жёсткости системы конечных элементов;

U – вектор-столбец узловых перемещений;

F – вектор-столбец динамической нагрузки, приведенной к узлам конечно-элементной сетки;

G , B – гироскопическая матрица и матрица демпфирования.

На рис. 6. приведена частотная диаграмма (диаграмма Кэмпбелла) для пневмошпинделя после модернизации его правой опоры с указанием критических (резонансных) частот вращения, которые не должны совпадать с частотами рабочих режимов функционирования пневмошпинделя при механической обработке.

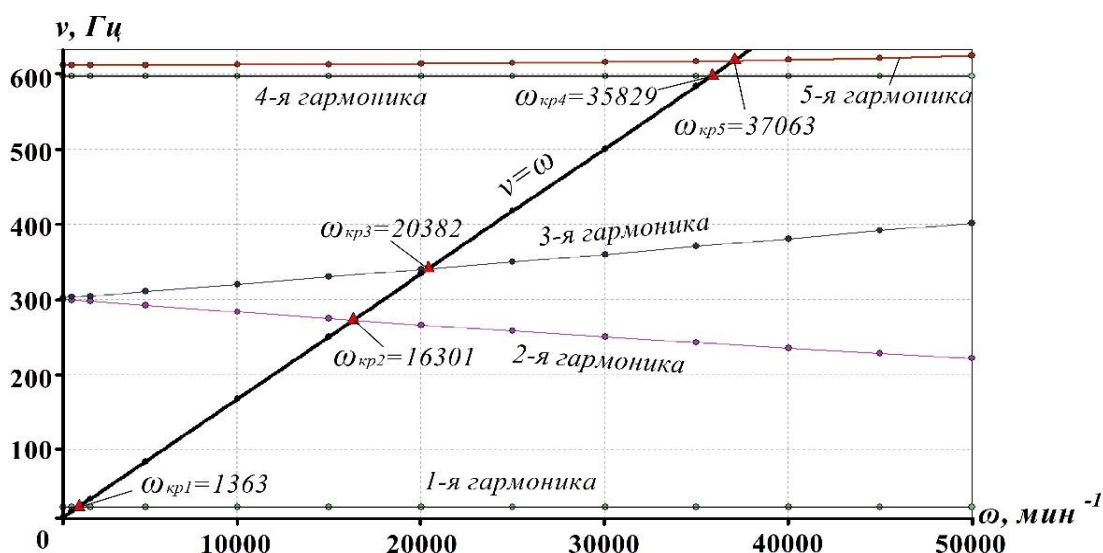


Рисунок 6. Диаграмма Кэмпбелла

На рис. 7. показаны результаты вычислительного эксперимента по определению отклика (по амплитуде колебаний) на искусственно введенный дисбаланс ротора при разгоне и выходе на установившемся режиме вращения [5, 7, 8].

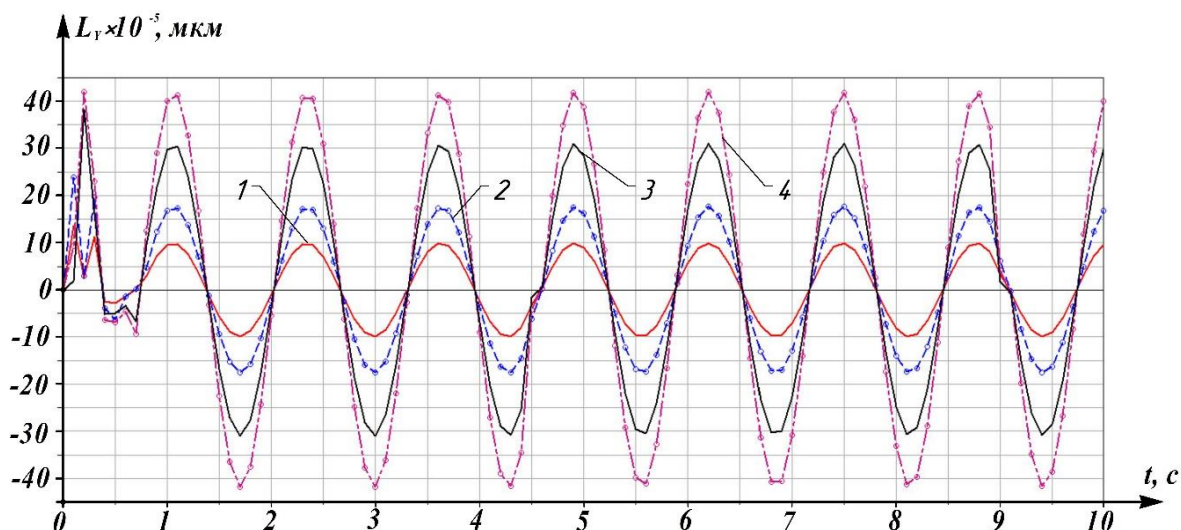


Рисунок 7. Отклик на дисбаланс: 1, 3 – колебания левой опоры и концевой части ротора после модернизации правой опоры; 2, 4 – колебания левой опоры и концевой части ротора до модернизации

На рис. 8. показана оценка устойчивости ротора при вращении под технологической нагрузкой и без неё. Она оценивалась по радиусу орбитального движения центров масс конусов левой и правой опор ротора после модернизации правой опоры.

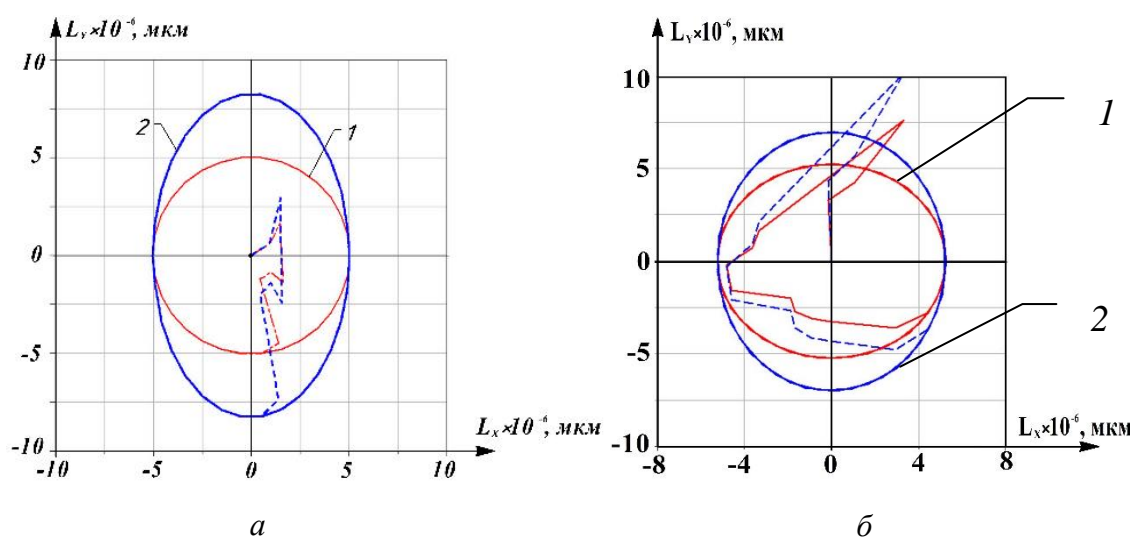


Рисунок 8. Траектории центров масс левой (а) и правой (б) аэростатических опор после усиления правой опоры пневмошпинделя: 1 – колебания опор без нагрузки ($\varepsilon = 0$); 2 – колебания опор под максимальной нагрузкой с относительным эксцентриситетом в опоре $\varepsilon = 0,8$

Модернизация правой конической аэростатической опоры раззенковкой питателей и создание внутри зазора бесконтактного лабиринтного уплотнения привели к существенному (более чем в 2 раза) уменьшению радиусов или амплитуд орбитального движения опор при вращении ротора [5, 7].

4. Выводы

Выполненные вычислительные компьютерные эксперименты позволили впервые исследовать средствами САПР статические и динамические интегральные характеристики пневмошпинделя на конических аэростатических опорах. Вычисления проведены при различных настройках регулируемого пневмошпинделя и варьировании нагрузок. Были исследованы несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха, собственные частоты колебаний, амплитуды вынужденных колебаний, отклики на вводимый дисбаланс. При этом исследовались как отдельные опоры пневмошпинделя – правая и левая – так и весь пневмошпиндель. Разработанная методика вычислительных экспериментов позволила получить результаты с уровнем сходимости с результатами аналитических расчётов и натуральных экспериментальных исследований не менее 88 %.

Вычислительными экспериментами была подтверждена эффективность регулирования интегральных характеристик пневмошпинделя через изменение величины среднего зазора в его опорах. Также была показана эффективность модернизации правой аэростатической опоры, которая привела к повышению жёсткости и несущей способности пневмошпинделя, снижению расхода технологического воздуха, повышению его динамической устойчивости – снижению амплитуд колебаний и орбитальных движений конических опор ротора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преимущества и недостатки высокоскоростной обработки: [сайт StankoffRu]. – М, 2023 – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/981> (дата обращения: 14.06.2023).
2. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования оборудования бесконтактного типа с регулируемыми характеристиками для высокоскоростной механической обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Брешев В. Е. – Луганск, 2021. – 42 с.
3. Рябичев, В. Д. Основы расчёта энергосберегающих опор с газовой смазкой для оборудования механической обработки / В. Д. Рябичев, В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – № 1(30). – С. 10–19.
4. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. – М.: Наука, 1982. – 265 с.
5. Брешев, В. Е. Приводы машин на регулируемых конических аэростатических опорах: Монография / В. Е. Брешев, А. В. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 204 с.
6. Nelson, H.D. The dynamics of rotor bearing systems using finite elements / H.D. Nelson, J.M. McVaugh // Journal of Engineering for Industry. – 1976. –Vol. 98. – P. 593–600.
7. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: Монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 208 с.
8. Czolczynski, K. Rotordynamics of gas-lubricated journal bearing system / Krzysztof Czolczynski. – New York: Mechanical engineering series, Springer Verlag, 1999. – 161p.

Поступила в редколлегию 19.03.2023 г.