

УДК 621.9:004.94

Methodology for the development of a digital model of a mechatronic motor-spindle system for the study of its vibration resistance

Методика разработки цифровой модели мехатронной системы мотор-шпиндель для исследования его виброустойчивости

Y. V. Idrisova¹, A. N. Tipeev², D. A. Perevertaylo³
Ю. В. Идрисова¹, А. Н. Тупеев², Д. А. Перевертайло³

^{1,2} Ufa State Aviation Technical University, Marx str. 12, Ufa, 450001, Russia

³ Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Professora Popova 5 str., St. Petersburg, 197376, Russia

¹ yu.v.idrisova@mail.ru

^{1,2} Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450001, Уфа, ул. К. Маркса, 12

³ Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197376,

Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

¹ yu.v.idrisova@mail.ru

ABSTRACT

Development of digital models. A digital model represents the geometric, physical, and dynamic properties of an object. Digital models can be performed using computational experiments, developing methods for expanding technological capabilities, organizing support and implementing solutions for the comprehensive diagnostics of the technical state of the machine system and process indicators.

The article discusses the methodology for creating a digital model using an example of a motor spindle of a mechatronic machine with CNC and the study of dynamic processes in a motor spindle. The basis of the digital dynamic model was the model of the mechanical part of the spindle implemented in SolidWorks CAD, which was then exported using the SolidWorksLink model translator into the SimMechanics modeling environment of the MatLab system. The adequacy of the obtained model to a real object is proved. Models of perturbing influences arising from the operation of machine equipment have been created. Tests were performed on the motor-spindle model, the influence of manufacturing errors of the motor-spindle elements on the positioning accuracy of the spindle assembly, depending on its dynamic characteristics, was estimated.

KEYWORDS

Digital model; adequacy; modal analysis; natural frequencies; vibration processes.

АННОТАЦИЯ

Разработка цифровых моделей сложных технических объектов является актуальной темой в развитии концепции цифрового производства. Цифровая модель отражает геометрические, физические и динамические свойства объекта. С использованием цифровой модели могут проводиться вычислительные эксперименты, разрабатываться методы повышения технологических возможностей оборудования, организовываться поддержка и исполнение решений по многокритериальной диагностике технического состояния станочной системы и показателей технологических процессов обработки, а так же осуществляться отработка и создание алгоритмов управления оборудованием и процессом.

В статье рассмотрена методика создания цифровой модели на примере мотор-шпинделя мехатронного станка с ЧПУ и изучение динамических процессов, протекающих в мотор-шпинделе. Основой цифровой динамической модели являлась модель механической части шпинделя реализованная в САПР SolidWorks, которая далее была экспортирована с использованием транслятора модели SolidWorksLink в среду моделирования SimMechanics системы MatLab. Доказана адекватность полученной модели реальному объекту. Созданы модели вибровозмущающих воздействий, возникающих при работе станочного оборудования. Проведены испытания модели мотор-шпинделя на виброустойчивость, оценено влияние погрешностей изготовления элементов мотор-шпинделя на точность позиционирования шпиндельного узла, в зависимости от его динамических характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровая модель; адекватность; модальный анализ; собственные частоты; вибрационные процессы.

Введение

Разработка модели объекта или системы в целом является одним из этапов при подготовке к изучению поведения объекта или системы. Одним из популярных видов моделирования стало компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем [1, 4, 11]. Чаще всего компьютерное моделирование выполняется в системах автоматизированного проектирования (САПР).

В САПР создается модель, которая полностью отражает геометрию, цвет и размеры исследуемого объекта, но не отражает его физические свойства. Совокупное использование различных систем моделирования позволяет создать модель физического объекта, учитывающую динамических свойства исследуемого объекта.

В качестве объекта моделирования рассматривался шпиндель ET100-3-380 – шпиндель на основе асинхронного двигателя (мотор-шпиндель) с жидкостным охлаждением и ручной установкой инструмента, предназначенный для фрезерно-гравировальных работ и сверления. Данная модель шпинделя находит наиболее частое применение на портальных фрезерных, гравировальных и раскройных станках.

Конструктивно, шпиндель ET100-3-380 выполнен на основе трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 3 кВт. Вал шпинделя и ротор являются единой конструкцией, установленной на радиально-упорные подшипники. В качестве переднего подшипника используется прецизионный дуплексный подшипник схемы «тандем», тип 7005С, с углом контакта 15° , в качестве заднего – один радиально-упорный 7003С с углом контакта 15° . Все подшипники гибридные – со стальными обоймами и керамическими шариками, закрытого типа, с заложеной консистентной смазкой. Модель механической части шпинделя реали-

зована в САПР SolidWorks, которая далее была экспортирована с использованием транслятора модели SolidWorksLink в среду моделирования SimMechanics системы MatLab [7, 9, 10, 12].

1. Моделирование процессов в мехатронной системе мотор-шпиндель

Модель шпинделя состоит из множества элементов, и для последующей передачи в *SimMechanics* необходимо данную модель упростить. В частности, провести укрупнение элементов и обеспечить кинематическую подвижность в соответствии с технологическим назначением. При проведении анализа были выявлены группы элементов, которые подвижны и неподвижны относительно друг друга. Таким образом, неподвижные элементы были сгруппированы в одну сосредоточенную массу, а подвижные – в другую. Оценка адекватности принятых упрощений была проведена с использованием сравнительного анализа собственных частот шпинделя, полученных экспериментально и при помощи модального анализа модели в системе *SolidWorksSimulation*.

На измеряемый узел закрепляются датчики вибрации в направлении трех осей координат X , Y и Z . Молотком совершаются удары вдоль направления осей крепления датчиков с противоположной стороны. Временной сигнал колебаний значений ускорения фиксируется датчиками, и данные поступают в компьютер. С помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), на которой видны частоты и амплитуды колебаний детали, измеренной вибропреобразователем.

На основе проведенного эксперимента были получены значения собственных частот шпиндельного узла, представленных на рис. 1.

Модальный анализ был проведен в системе *SolidWorksSimulation*, и были выявлены собственные частоты конструкции, представленные на рис. 2.

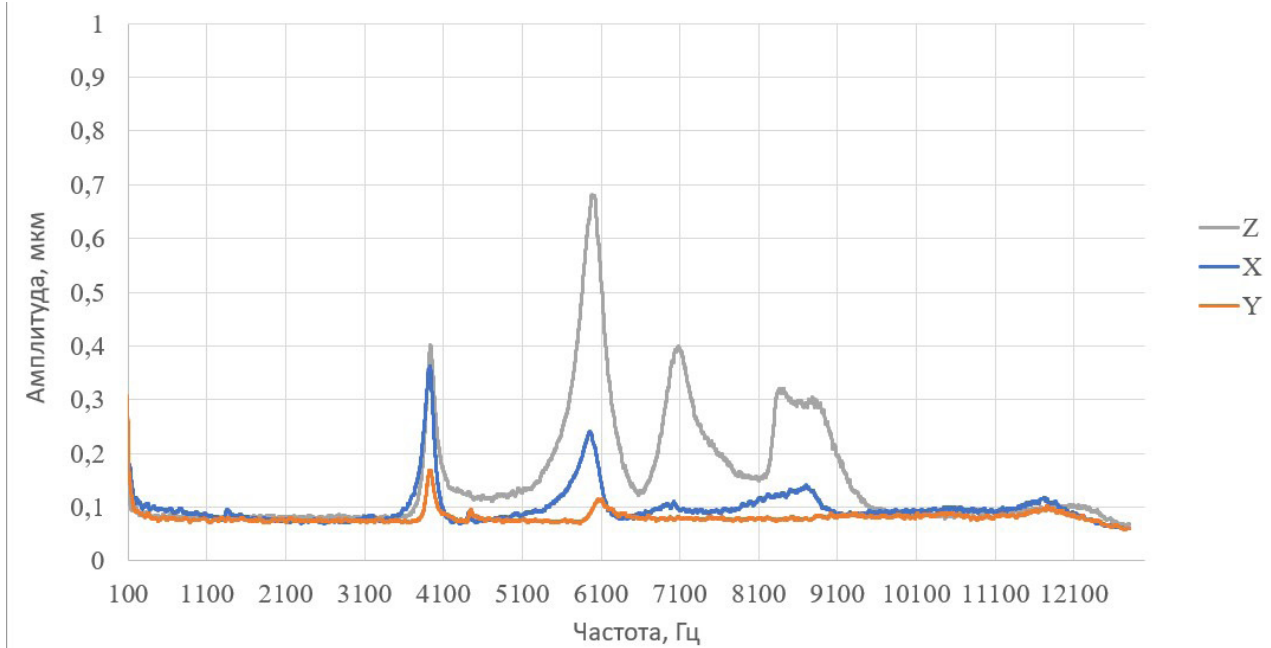


Рис. 1. Собственные частоты шпиндельного узла, полученные экспериментально

Fig. 1. Natural frequencies of the spindle assembly obtained experimentally

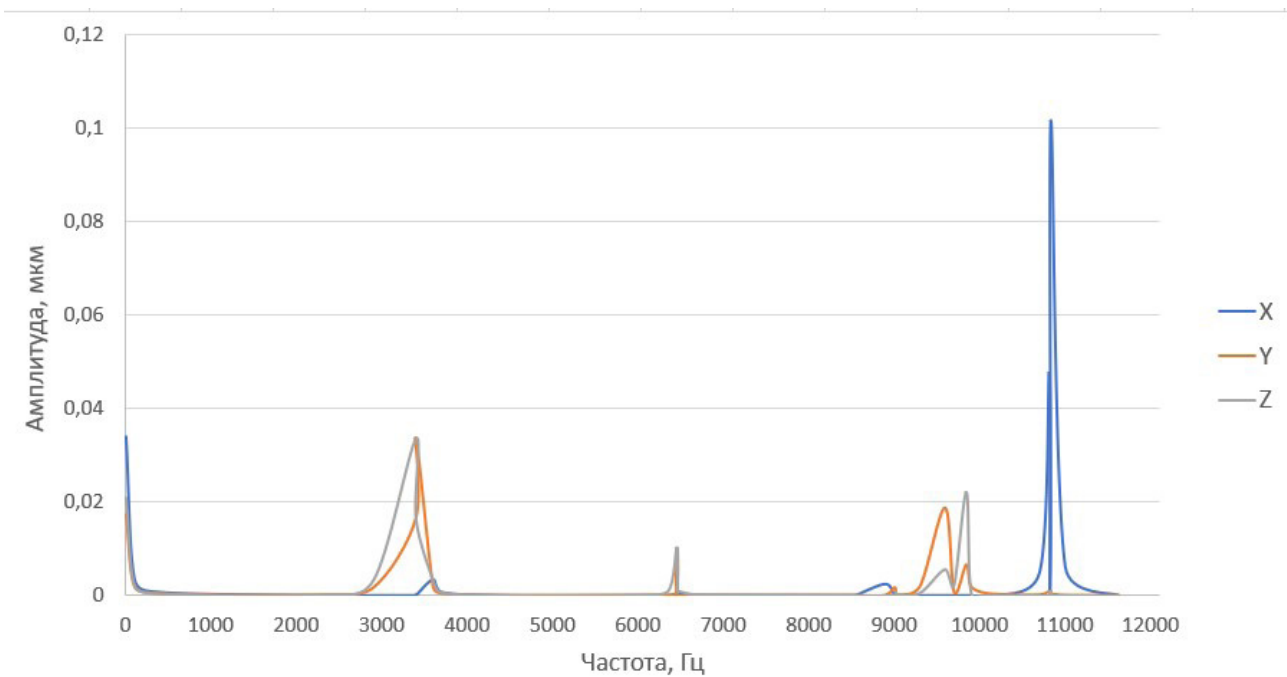


Рис. 2. Собственные частоты шпиндельного узла, полученные с помощью *SolidWorks*

Fig. 2. Natural frequencies of the spindle unit obtained using *SolidWorks*

Полученные данные сведены в табл. 1. Как видно из таблицы, некоторые частоты, полученные теоретическим путем, отсутствуют, так как некоторые элементы модели

шпиндельного узла были упрощены (шарики подшипников, обмотка ротора, соединительные элементы).

Экспериментальные и теоретические частоты

Experimental and theoretical frequencies

Экспериментальные данные, Гц	Теоретические данные, Гц	Экспериментальные данные, Гц	Теоретические данные, Гц
3392	3 393,8	8546	8 545,6
3398	3 397	8896	8 894,9
3925	–	9003	9 002,4
4342	4 343,8	9022	9 021,3
6003	–	9593	9 594,6
6455	6 453,7	9843	9 844,9
6461	6 461,1	10816	10 815
7096	–	10834	10 833
8076	8 075,8	10837	10 836
8393	–	11003	11 003
8499	8 499,2	11628	11 628

Проведено сравнение полученных частот, на основе которого было выявлено, что упрощенная модель, представленная в *SolidWorks*, является адекватной реальному объекту с точностью 99 %. В результате этого можно судить о верно выбранном подходе к упрощению модели для дальнейшей передачи в MATLAB и проведении запланированных исследований динамических процессов.

В процессе трансляции геометрической 3D модели в динамическую модель осуществляется преобразование сопряжений между геометрическими деталями в степени свободы между телами. Полученную динамическую модель в среде *Matlab* дорабатывают в соответствии с поставленной задачей исследования в части реализации управляющих воздействий, обеспечения взаимодействий между деталями, регистрации результатов моделирования [3]. Моделирование в среде *Matlab* может проводиться в режимах прямой динамики (*forwarddynamics*) и обратной динамики (*inversedynamics*). В режиме прямой динамики задаются управляющие воздействия (силы, моменты), а измеряются выходные параметры движения: величины линейных и угловых перемещений, скорости, ускорения. В режиме обратной динамики исходными яв-

ляются перемещения тел, а в результате решения определяются силы (момент), обеспечивающие заданные перемещения.

Визуализация моделей *SimMechanics* автоматически создает трехмерную визуализацию всех тел модели. Во время симуляции автоматически создается анимация модели машины, показывая движения системы. Можно воспроизвести анимацию без повторного запуска симуляции и сохранить анимацию в файле. Имеется возможность настраивать цвет, прозрачность и другие визуальные свойства тел. Инструмент позволяет вывести каркас и центр масс тел в модели для более удобной проверки местоположения и ориентации тел. Одновременно можно просматривать механизм и его движения с разных углов зрения. Для исследования и навигации по модели в окне трехмерного обзора механизма доступен обозреватель древовидной схемы модели. Можно рассмотреть параметры для элементов в механизме при помощи выбора их в обозревателе древовидной схемы или в трехмерном представлении. Комбинация двухмерной блок-схемы и трехмерного визуального представления механизма позволяют пользователю проверять связи в модели и наблюдать, как ведет себя система.

Моделирование мехатронной системы мотор-шпинделя. Для построения модели мотор-шпинделя воспользуемся моделями, полученными в результате импорта *CAD*-модели в *SimMechanics (Matlab)* [12, 16, 20] и проектирования структурной схемы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором *SimPowerSystems (Matlab)*. На рис. 3 изображена общая модель, объединяющая данные с модели *Solidworks* и данные модели

с рассчитанными параметрами асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, учитывающая упруго-диссипативные связи и перемещение в трех направлениях: вращение и два поступательных – по оси *x* и по оси *y*.

Результат моделирования в графической форме представлен на рис. 4, в ходе запуска модели фреза вращается – модель работает корректно.

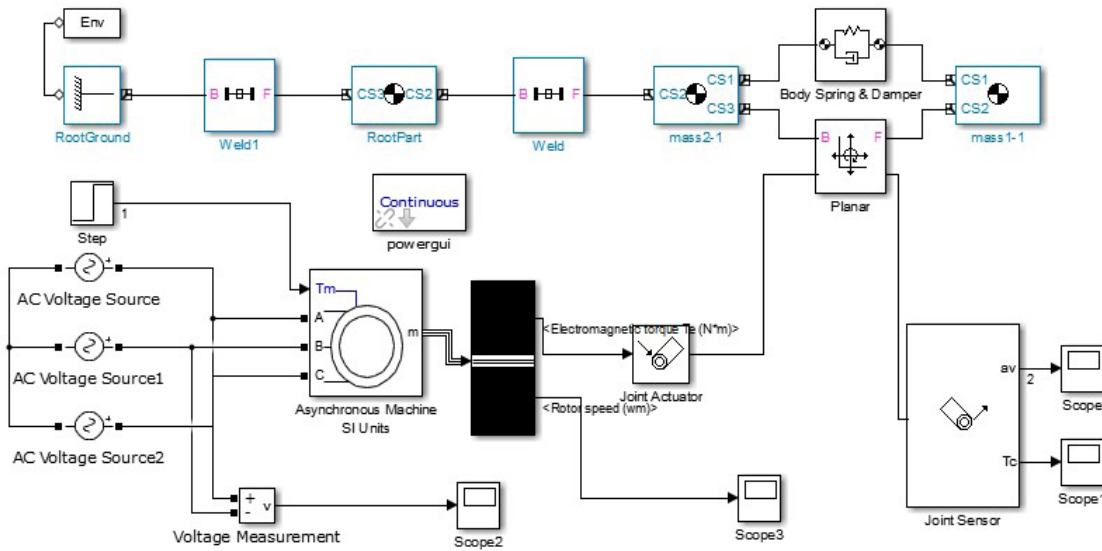


Рис. 3. Модель мотор-шпинделя с использованием блока, имитирующего упруго-диссипативные связи между элементами

Fig. 3. A motor-spindle model using a block simulating elastic-dissipative bonds between elements

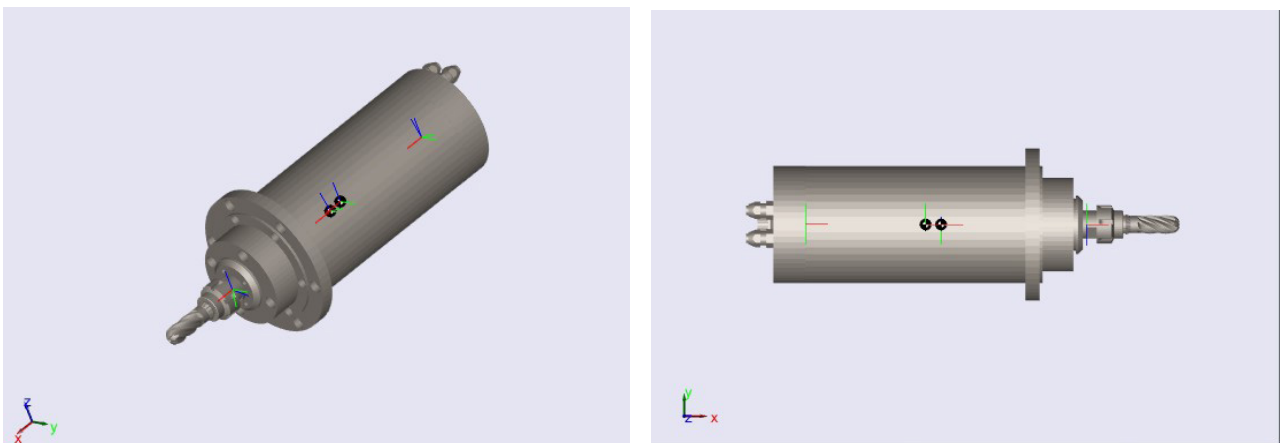


Рис. 4. Результат моделирования в пакете *Matlab*

Fig. 4. The simulation result in the Matlab package

Полученная модель может быть использована для дальнейших исследований процессов, протекающих в системе, а также для создания диагностических баз данных.

2. Исследование вибрационных процессов в мехатронной системе мотор-шпиндель

Вибрация и резонансные явления в машинах и механизмах играют исключительно важную роль. Для прецизионных, высокоскоростных станков вибрация пагубно влияет на точность обрабатываемых изделий и может приводить к их неравномерному нагреву, растрескиванию и браку.

Одной из причин вибрации являются силовые кинематические возмущения, связанные с погрешностями вращающихся элементов, которые вызывают вынужденные колебания инструмента и обрабатываемой детали [2, 3, 5, 6, 8]. Вследствие относительных колебаний инструмента и детали возникают «волны», которые являются причиной возникновения погрешностей обрабатываемой поверхности детали. В связи с этим особое значение приобретают методы управления, компенсирующие уровень вибрации в процессе функционирования станка.

На рис. 2–6 приведены результаты моделирования мотора шпинделя при имитации следующих видов дефектов:

- неоднородный радиальный натяг подшипника;
- повреждение наружного кольца подшипника качения;
- дисбаланс ротора.

Неоднородный радиальный натяг подшипника является обычно дефектом его сборки, в частности, следствием посадки подшипника на вал, диаметр которого больше допустимого, перекоса вращающегося кольца, повышенной осевой нагрузки на подшипник. Признаком этого дефекта является рост гармонических составляющих в спектре огибающей вибрации на четных и, прежде всего, на второй гармонике частоты вращения вала [13–15] (рис. 5, 6).

Проявляется этот дефект обычно сразу после установки нового подшипника, сопровождается ростом вращающейся нагрузки в двух противоположных точках внутреннего кольца подшипника и приводит к ускоренному износу из-за перегрузок, действующих на поверхности качения. По мере износа эти перегрузки снижаются, и признаки неоднородного натяга могут исчезнуть, однако ускоренный износ подшипника продолжится.

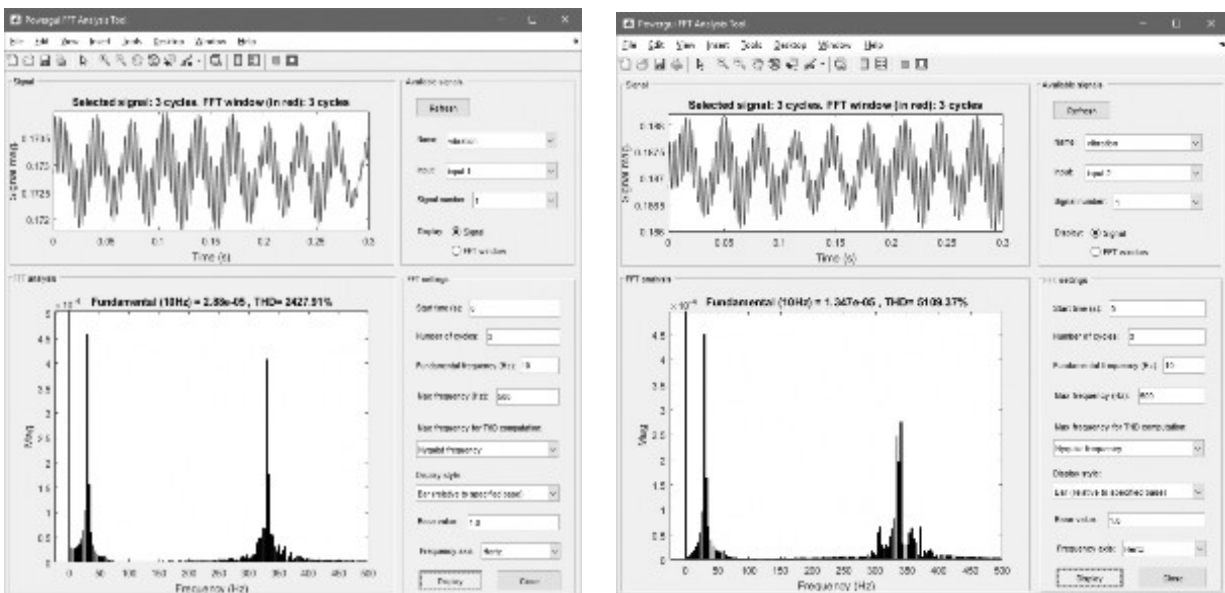


Рис. 5. Спектры виброскорости опор вращения с двух сторон при неоднородном радиальном натяге
 Fig. 5. Vibrational velocity spectra of rotation bearings on both sides with inhomogeneous radial interference

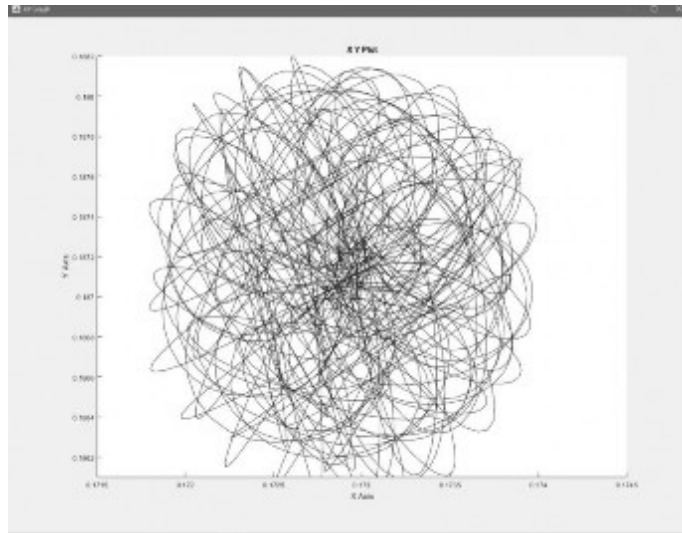


Рис. 6. Рассчитанная траектория оси движения

Fig. 6. The calculated trajectory of the axis of movement

Повреждения наружного кольца подшипника качения сопровождаются ударными вибрационными импульсами, амплитуда которых быстро растет по величине. Уровень фона вибрации (рис. 7) по своей величине при этом почти остается неизменным, т. к. дефект носит локальный характер и на общем

состоянии подшипника пока не сказывается [17–19].

Основной причинами дисбаланса ротора является смещение оси инерции относительно оси вращения, что приводит к появлению центробежных сил и как следствие биениям (рис. 8).

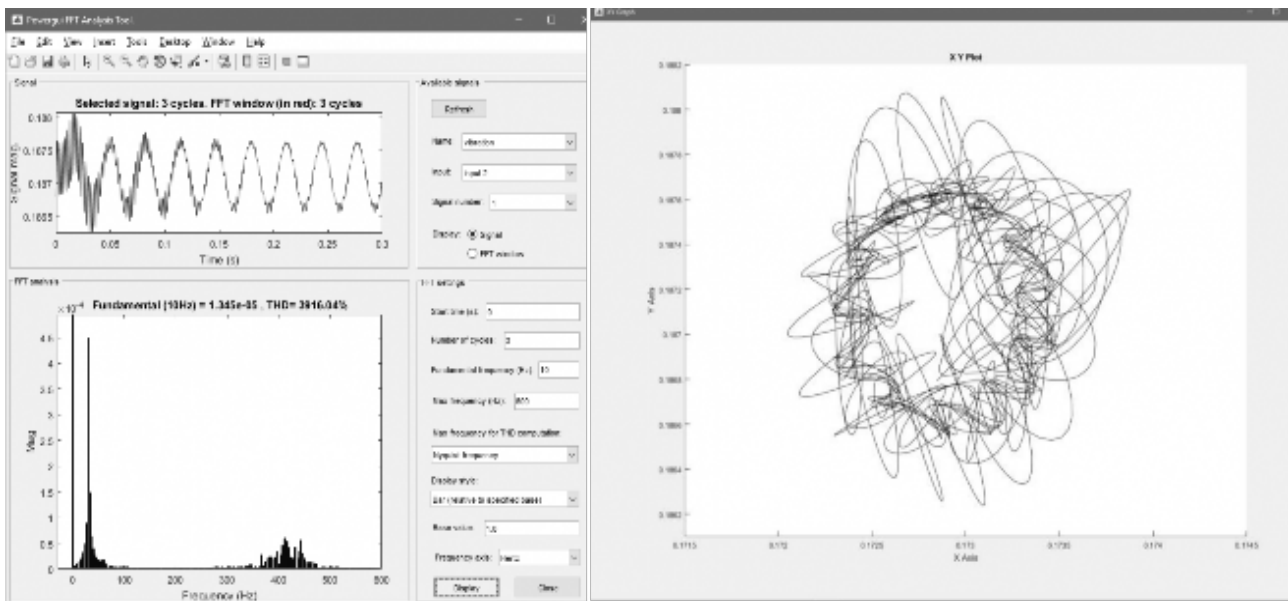


Рис. 7. Спектр и траектория оси движения опор вращения при начальных признаках появления дефекта в наружном кольце

Fig. 7. Spectrum and trajectory of the axis of motion of the bearings of rotation at initial signs of the appearance of a defect in the outer ring

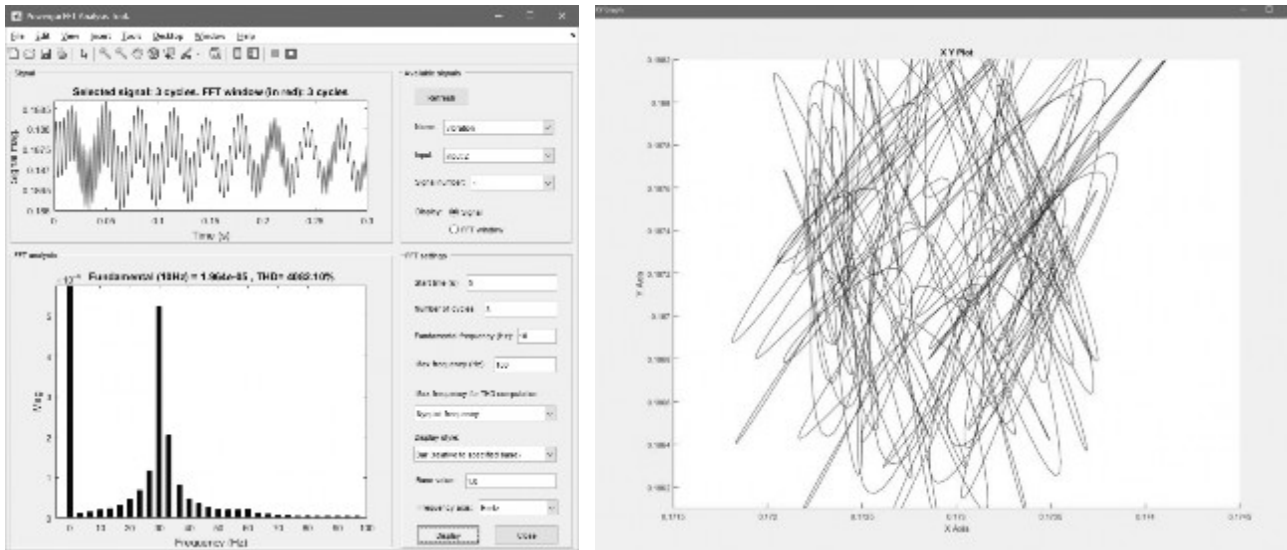


Рис. 8. Спектр и траектория оси движения опор вращения с двух сторон при расцентровке вала

Fig. 8. Spectrum and trajectory of the axis of movement of the bearings of rotation from two sides when aligning the shaft

В результате графики переходного процесса скорости вращения шпинделя на установленном режиме приобретают колеба-

тельный характер (рис. 9, б) по сравнению со штатным режимом работы (рис. 9, а).

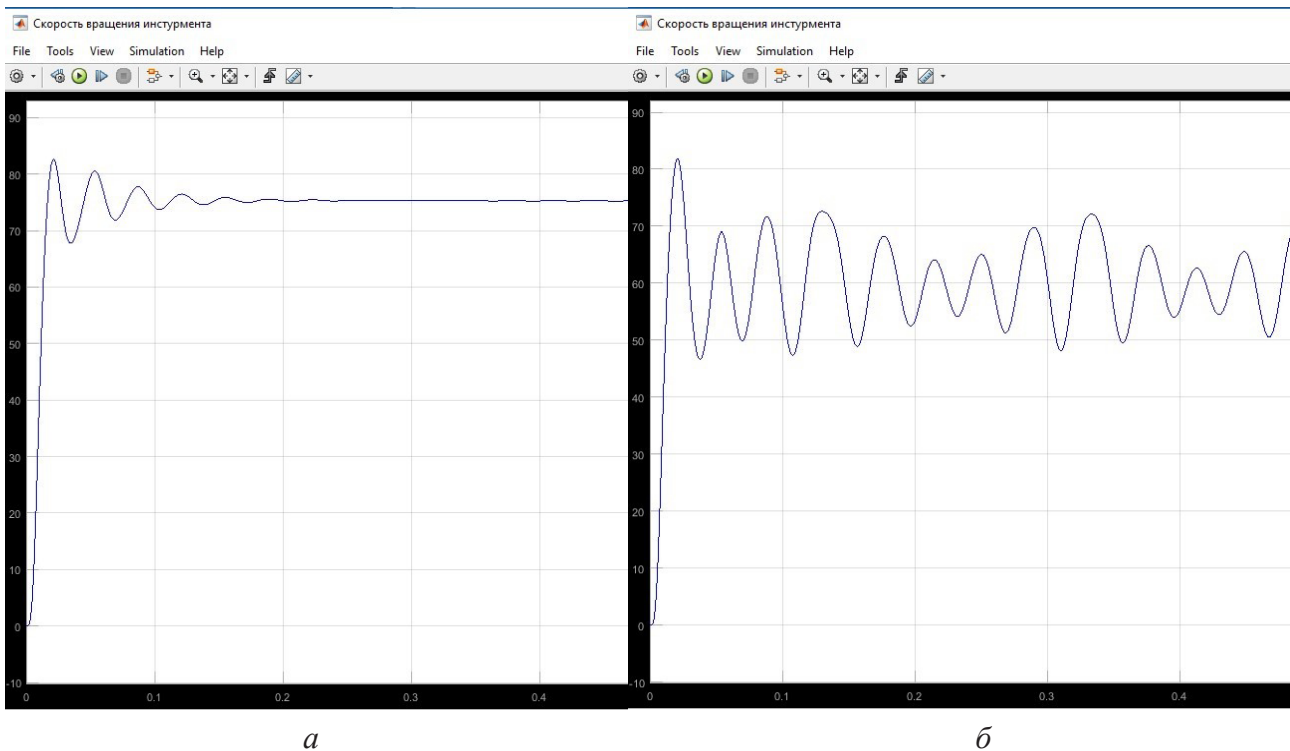


Рис. 9. Графики переходного процесса скорости вращения шпинделя: а – при работе в штатном режиме; б – при дисбалансе ротора

Fig. 9. Spindle speed transient graphs: а - during normal operation; б - with imbalance of the rotor

Таким образом, возникающие в силу различных причин вибрации шпинделя приводят к колебаниям его скорости вращения, что отрицательным образом может повлиять на качестве обрабатываемой поверхности детали.

Выводы

В статье показан принцип работы мотор-шпинделя, определены составные части сборки мотор-шпинделя для создания упрощенной модели. В ходе проведенного исследования были выявлены собственные частоты шпиндельного узла, полученные при модальном анализе в *SolidWorksSimulation* и эксперименте, проведенном в ходе научного проекта, расчетные и экспериментальные значения совпадают с точностью 99 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Создана цифровая модель мехатронной системы мотор-шпинделя на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, проведены исследования влияния погрешностей изготовления элементов на модель – результаты моделирования показали изменение точности позиционирования шпиндельного узла в зависимости от его динамических характеристик.

Применение цифровой модели позволяет прогнозировать состояние объекта с более высокой степенью достоверности, предсказывать возможные нештатные ситуации, оперативно на них реагировать, выявлять слабые звенья и улучшать конструктивные особенности мехатронной системы.

Список литературы

1. Luo W., Hu T., Zhang C. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy // *Journal of Ambient Intell Human Comput.* 2019. V. 10. P. 1129–1140. DOI: 10.1007/s12652-018-0946-5.
2. Pakdemirli M., Ulsoy A. G. Perturbation Analysis of Spindle Speed Variation in Machine Tool // *Journal of Vibration and Control.* 1997. V. 7. P. 261–278. DOI: 10.1177/107754639700300302.
3. Петраков Ю. В. Simulation of chatter suppression for lathe machining // *Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».* 2016. V. 2, No. 77. P.68–72. DOI:10.20535/2305-9001.2016.77.78960
4. Powalka B., Jemielniak K. Stability analysis in milling of flexible parts based on operational modal analysis // *J. Manuf. Sci. Technol.* 2015. V. 9. P. 125–135. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.11.003.
5. CPS Modeling of CNC Machine Tool Work Processes Using an Instruction-Domain Based Approach / Jianzhong Yang et. al. // *Engineering.* 2015. V. 6. P. 247–260. DOI: 10.15302/J-ENG-2015054.
6. Active vibration control for a CNC milling machine / D. G. Ford et. al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2014. V. 228. P. 230–245. DOI: 10.1177/0954406213484224.
7. Altintas. Y. «Manufacturing Automation». Cambridge University Press, 2012. 366 p. DOI: 10.1017/CBO9780511843723.
8. Hardwick B. Identification and solution of machine tool chatter problems. In: *Conference proceedings of LAMADAMAP on laser metrology and machine performance I.* Southampton Institute, UK. 1993. P.123–139.
9. Koenigsberger F. and Tlustý J. *Machine tool Structures.* Pergamon Press, Volume 1, 1970.
10. Tlustý. J. *Manufacturing Processes and Equipment.* Prentice Hall, 2000.
11. Development of a digital twin of a CNC machine based on machine learning methods / Yu. G. Kabaldin et. al. // *Bulletin of the Don State Technical University.* 2019. V. 19, No. 1. P. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55.
12. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB: учеб. пособие / В. С. Щербаков и др. Омск: Изд-во сибиади, 2007. 84 с.
13. Malla C., Rai A., Kaul V. Rolling element bearing fault detection based on the complex Morlet wavelet transform and performance evaluation using artificial neural network and support vector machine // *Noise & Vibration Worldwide.* 2019. V. 50, No. 9–11. P. 313–327. DOI: 10.1177/0957456519883280.
14. Jalan A. K., Mohanty A. Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition // *Journal of Sound and Vibration.* 2009. V. 327. P. 604–622.
15. Барков А. В. Диагностика: Возможности нового поколения систем мониторинга и

диагностики. Prostoev_NET – Информационный портал /.62. URL: <http://www.prostoev.net/modules/myarticles/article.php?Storyid=15>.

16. Simscape Multibody. Сайт компании – Электрон. Дан. URL: https://www.mathworks.com/products/sim-mechanics/download_smlink.html.

17. Kozochkin M. P., Sabirov F. S. Measurement of spatial vibrations for diagnostics of the performance of a set of spindle assemblies // *Measurement Techniques*. 2017. V. 59, No. 12. P.1310–1315. DOI:10.1007/s11018-017-1134-2.

18. Kozochkin M. P. The influence of the dynamic characteristics of machine components

on vibration during cutting // *STIN*. 2014. V. 2. P. 4–9.

19. Diagnostics and monitoring of spindle bearings *Russian Engineering Research* / M. P. Kozochkin et. al. // *STIN*. 2014. V. 34, No. 1. P. 34–36.

20. Zhukov Yu. A., Gorbunov A. V., Lychagin Yu. V. Creating a simulation model of hexapod dynamics in the integration of SOLIDWORKS and MATLAB // *Computer-aided design in mechanical engineering*. 2017. V. 5. P. 98–103.