

УДК 621.9-114

ОБЗОР НАУЧНО-ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СТАНКОВ С ЧПУ НА ОСНОВЕ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Шулаев И.Д., Поляков А.Н., Крылова С.Е.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург, e-mail: anp_temos@mail.ru

В работе представлен обзор научно-проектных решений по изготовлению станков с ЧПУ на основе использования мехатронных модулей. Представлен вариант решения задачи проектирования станка, реализующего полуступенчатую и высокоскоростную обработку. Для этого предложено использовать два шпиндельных узла, расположенных на одной поворотной колонне. Выполненные проектные работы позволили предложить вместо одного гамму станков, оснащенных мехатронными модулями, реализующими разные технологические возможности, в зависимости от комбинации используемого набора мехатронных модулей. В качестве способов достижения поставленной цели были использованы: установка автоматической двухступенчатой коробки скоростей; установка мехатронного модуля в виде глобусного стола с токарной функцией и редуктором по оси А; установка одноосного стола; установка агрегатной модульной поворотной стойки с гидравлическим конусным зажимом и силовым редуктором; установка шпиндельного узла для силового резания; установка мехатронного модуля в виде высокоскоростного шпиндельного узла для финишной обработки. Выходные параметры спроектированной гаммы станков обоснованы с использованием инженерного анализа. Предварительные геометрические параметры проектируемых конструкций обосновывались с использованием Autodesk Inventor. Окончательные решения получены при использовании САЕ-системы Ansys.

Ключевые слова: модульные станки, поворотная модульная стойка, высокоскоростной шпиндельный узел, глобусный стол

OVERVIEW OF SCIENTIFIC DESIGN SOLUTIONS FOR PRODUCING CNC MACHINE TOOLS BASED ON MECHATRONIC MODULES

Shulaev I.D., Polyakov A.N., Krylova S.E.

Orenburg State University, Orenburg, e-mail: anp_temos@mail.ru

The paper provides an overview of scientific and design solutions for the manufacture of CNC machine tools based on the use of mechatronic modules. A variant of solving the problem of designing a machine tool that implements semi-finishing and high-speed machining is presented. For this, it is proposed to use two spindle assemblies located on one rotary column. The completed design work made it possible to offer instead of one a range of machine tools equipped with mechatronic modules that implement different technological capabilities, depending on the combination of the used set of mechatronic modules. The following methods were used to achieve this goal: installation of an automatic two-stage gearbox; installation of a mechatronic module in the form of a globe table with a turning function and a gearbox along the A axis; installation of a uniaxial table; installation of an aggregate modular swinging column with a hydraulic cone clamp and a power reducer; installation of a spindle unit for power cutting; installation of a mechatronic module in the form of a high-speed spindle assembly for finishing. The output parameters of the designed range of machine tools are justified using engineering analysis. The preliminary geometrical parameters of the designed structures were justified using Autodesk Inventor. The final solutions were obtained using the Ansys CAE system.

Keywords: numerically controlled machines, modular rotary modular column, high speed spindle unit, globe table, modular machine tools

Современные станки с ЧПУ характеризуются ростом рабочих подач и реализуемых на них скоростей резания [1–3].

Проведенный обзор технических характеристик современных обрабатывающих станков показал, что их условно можно разделить на две группы. Одна группа станков предназначена для выполнения скоростного силового резания. Другая – для выполнения скоростной обработки. Поэтому была обозначена цель – спроектировать обрабатывающий центр, который позволит реализовать два типа резания: для выполнения скоростного силового резания и для выполнения высокоскоростной обработки.

Материалы и методы исследования

Для разработки проекта в качестве базового станка использовали координатно-рас- точной станок модели 24К40АФ4–01.

Были выбраны следующие способы достижения поставленной цели: изменение кинематики коробки скоростей с расширением диапазона частот вращения вертикального силового шпинделя станка; установка мехатронного модуля в виде глобусного стола с токарной функцией и редуктором по оси А; установка агрегатной модульной поворотной стойки с гидравлическим конусным зажимом и силовым редуктором; установка шпиндельного узла для силового резания с гидравлическим тормозом; установка высокоскоростного шпиндельного узла для финишной обработки; установка новой системы числового программного управления, обеспечивающей одновременное управление пятью осями.

При реализации вышеназванных способов достижения поставленной цели были выполнены следующие технические разра-

ботки: проект привода главного движения станка с автоматической коробкой скоростей; проект силового и высокоскоростного шпиндельных узлов; проект глобусного стола с токарной функцией и редуктором по оси А; проект агрегатной поворотной модульной стойки с силовым редуктором; проект гидравлических схем для глобусного стола и агрегатной поворотной стойки.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ выбранных режимов резания позволил определить диапазон частот вращения шпиндельного узла, развиваемую мощность и крутящий момент в приводе главного движения. Это позволило спроектировать новую кинематическую схему обрабатывающего центра.

Силовой расчет автоматической коробки скоростей, включающий расчет зубчатых передач, валов и подшипников, был выполнен в автоматизированной системе проектирования Autodesk Inventor [4]. По результатам выполненного кинематического расчета привода с бесступенчатым регулированием был выполнен проект привода главного движения станка с автоматической коробкой скоростей (АКС). В АКС станка в качестве механизма переключения скоростей использована электромагнитная зубчатая муфта.

Проект глобусного стола с токарной функцией и редуктором по оси А. В станках с ЧПУ широко применяют различные механизмы периодического поворота с последующей фиксацией положения поворачиваемых узлов. Эти механизмы улучшают эксплуатационные возможности и производительность станков, обеспечивают сложную траекторию перемещения инструмента, повышают качество деталей [5].

На рис. 1 представлена конструкция глобусного стола, разработанного авторами. Особенности конструкции являются: по оси А – возможность наклона и фиксации под углом (до 120°); по оси С – возможность фиксации под любым углом с точностью до 15»; по оси С – возможность токарной функцией до 500 об/мин. Вращение заготовки вокруг оси С и с возможностью наклона по оси А станка позволяет совершать такие технологические переходы: круговое фрезерование, обработка отверстий; шпоночных канавок; фрезерование пазов и шлицев. При одновременном управлении всеми координатами станка появляется возможность обработки деталей сложного профиля. В качестве прямого привода, обеспечивающего вращения планшайбы стола, выступает мотор-шпиндель, которые совме-

щает в своей конструкции электрический синхронный двигатель. Наклон глобусного стола под необходимым углом (от +30° до +120°) обеспечивается червячным редуктором с передаточным отношением 1:45. В качестве привода наклона глобусного стола служит серводвигатель Siemens модели 1FK7060-5AF71-1. Передача крутящего момента на редуктор от двигателя осуществляется через предохранительную муфту и ременную передачу. Контроль дискретности стола осуществляет датчик обратной связи HIDDENHAIN RCN 8000. Фиксацию глобусного стола по осям А и С осуществляет гидравлический тормозной механизм, управляемый электромагнитным клапаном соответствующей оси. Тормоз расположен максимально близко к рабочему столу (планшайбе), что позволяет минимизировать биение стола при обработке и зажиме, делая рабочий стол пригодным для работы в тяжёлых режимах.

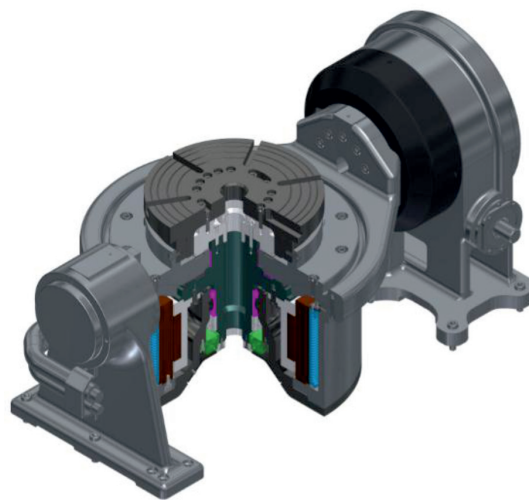


Рис. 1. Проект глобусного стола

Проект агрегатной модульной поворотной стойки. Спроектированная авторами поворотная стойка была спроектирована для расширения технологических возможностей станка (рис. 2). Ее поворот на 180° приводит к смене рабочего положения одного из шпинделей станка. Поворотная стойка вращается вокруг внутренней неподвижной колонны за счет упорно-радиального подшипника со сферическими роликами 90392/500 ГОСТ 9942-90, установленного на фланце внутренней колонны. Применение этого типа подшипника обеспечило компенсацию несоосности осей стойки и внутренней неподвижной колонны, так как упорно-радиальный сферический ролик подшипник является самоустанавливающимся.

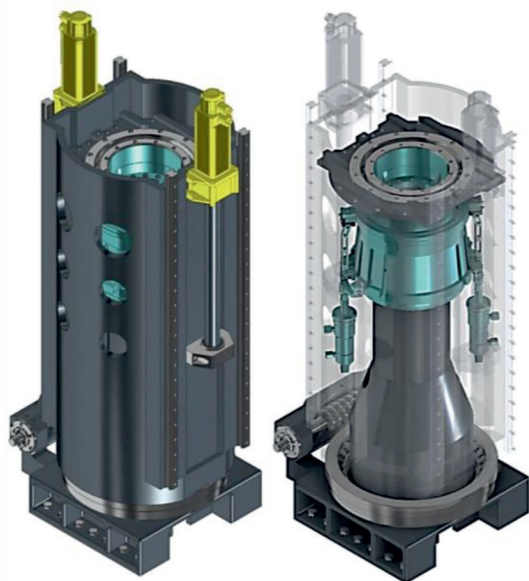


Рис. 2. Агрегатная поворотная модульная стойка

Поворот стойки на 180° осуществляет спроектированный силовой червячный редуктор, расположенный у основания поворотной стойки и передающий момент от крупномодульного червяка к зубчатому сектору червячного колеса. Фиксацию колонны выполняет механизм, состоящий из двух конусных деталей, расположенных в верхней части поворотной стойки. Первая деталь – конусная гильза монтируется неподвижно к внутренней колонне, она же является частью подшипникового узла, выполняющей роль заделки в верхней части между поворотной стойкой и внутренней колонной. Вторая де-

таль – конус с упругими лепестками, который перемещается в осевом направлении за счет тяги штока силового гидроцилиндра. Фиксация двух деталей и поворотной стойки, соответственно, происходит за счет сил трения между контактируемыми поверхностями упругих лепестков и рабочих поверхностей конусной гильзы.

Проект высокоскоростного и силового шпиндельного узла. Мотор-шпиндель – это шпиндель со встроенным приводом. Шпиндель вращается со скоростью, развиваемой электродвигателем, и передает крутящий момент на оправку инструмента через устройство для его зажима [6]. Авторами был выполнен проект электрошпинделя для высокоскоростной чистовой и финишной обработки (рис. 3). В передней опоре установлено три радиально-упорных подшипника по схеме «Тандем-О», в задней опоре радиально-упорные подшипники установлены по схеме «О». Геометрические параметры шпинделя подбирались по результатам расчета статических характеристик, определенных в Autodesk Inventor. Перемещения на переднем конце составили чуть менее $3,5 \text{ мкм}$ при задании радиальной нагрузки, равной 650 Н и осевой – 450 Н .

Исследования в области тепловых процессов в многоцелевых станках показывают, что тепловые погрешности шпинделя могут составлять до 80% от общих тепловых погрешностей станка, обусловленных непрерывным вращением шпинделя в процессе обработки [7, 8]. А учитывая высокие частоты вращения спроектированного шпинделя (40000 об/мин), тепловые погрешности могут стать определяющими.

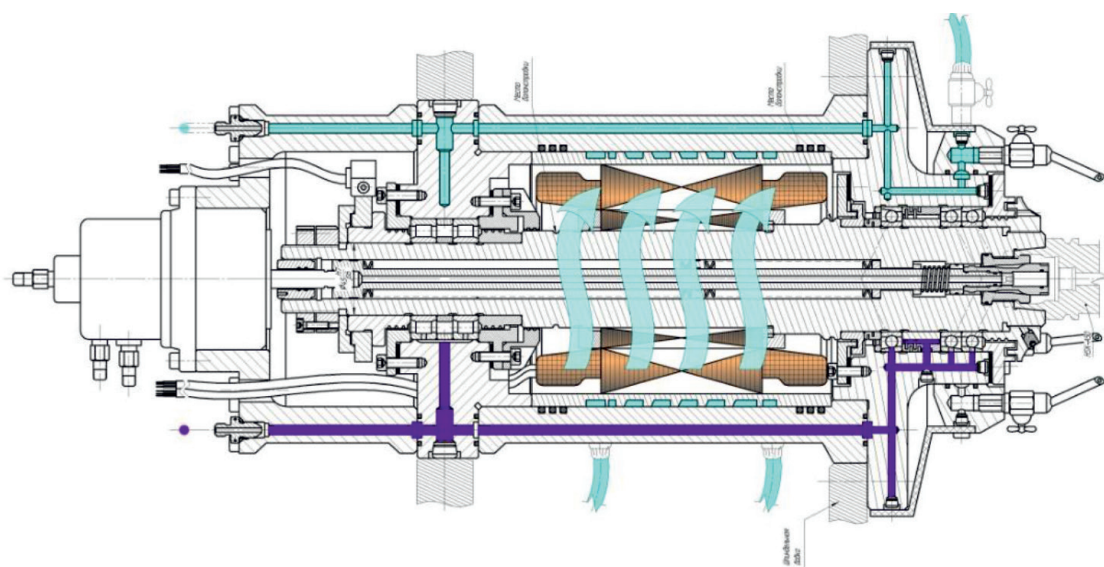


Рис. 3. Высокоскоростной шпиндельный узел с контуром охлаждения

Поэтому в конструкции шпиндельного узла было предложено использование специальных каналов для охлаждающей жидкости, нагнетаемой насосом в гильзу и огибающей обе опоры узла и обмотку встроеного двигателя.

Шпиндель для получистовой и чистой обработки (в данной концепции проекта – силовой). Авторами был выполнен проект шпиндельного узла на радиально-упорных подшипниках с автоматической коробкой скоростей (рис. 4). Соединение конца шпинделя с автоматической коробкой скоростей осуществлялось через беззазорную кулачковую муфту GAS/ SG для снижения энергопотребления и повышения производительности обработки [9]. При проектировании обоих шпиндельных узлов проводился инженерный анализ с построением статических, динамических и тепловых характеристик. Анализ статических характеристик шпинделя выполнялся в Autodesk Inventor [4]. При задании радиального нагружения 2000 Н и осевого – 1000 Н перемещения в точке приложения силы на переднем конце составили 2,28 мкм. Полный инженерный анализ шпиндельного узла выполнялся в системе Ansys в составе всей несущей системы станка [10].

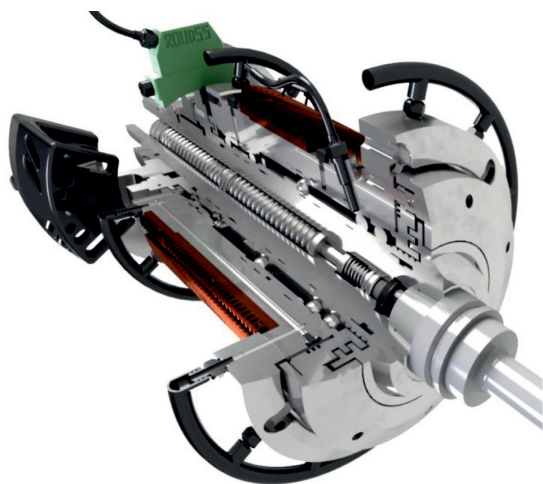


Рис. 4. Шпиндель для получистовой и чистой обработки

Проект модульных компоновок несущей системы станка. Разработка мехатронных модулей позволила предложить не один вариант компоновки нового многоцелевого станка, а гамму станков, спроектированных по модульному принципу. Применение модульного принципа существенно снижает себестоимость проектирования и изготовления гаммы стан-

ков. Для выполнения проектов модульных компоновок станков дополнительно был выполнен проект одноосевого поворотного стола и проект монолитной стойки. Это позволило разработать пять вариантов компоновочных решений на базе одной концепции. Компоновки представляют собой разные варианты оснащения станка мехатронными модулями, поворотными и монолитными стойками. Спроектированная гамма станков с различающимися компоновками и технологическими возможностями ориентирована под конкретные задачи заказчика, позволяя активно участвовать в реализации технологий «Индустрия 4.0» и отвечать динамичным запросам «Общество 5.0». Понятно, что формообразующие движения пятиосевого станка обеспечивают решение задач, предназначенных для трех- и четырехосевого станка. Однако жесткость пятиосевого станка – его слабое место. И для подготовки технологических баз предпочтительно использовать более жесткие трехосевые станки. В качестве примера на рис. 5 представлены четыре 3D модели спроектированных авторами станков, построенных на базе единых мехатронных модулей и модульных систем: а) двухшпиндельный станок с поворотной стойкой и вертикальным поворотным столом; б) пятиосевой станок для силового резания; в) пятиосевой станок для скоростного резания; г) трехосевой станок для скоростного резания. Оценка статических, динамических и тепловых характеристик выполнялась с использованием CAE-системы Ansys [10]. Первая собственная частота для несущей системы компоновки станка с поворотной стойкой, двумя шпиндельными узлами и глобусным столом составила около 26 Гц. Недостатком выполненных исследований являлась невозможность проведения полноценной конечно-элементной оптимизации конструкции в автоматическом режиме ввиду ее громоздкости (результаты инженерного анализа в этой работе не приведены ввиду существующих ограничений журнала. – Прим. авт.).

Заключение

Результатом выполненной работы является: проект обрабатывающего центра, реализующий скоростное силовое резание и скоростную обработку. Проект обрабатывающего центра представляет авторскую конструкторскую разработку. Конструкторская документация на все узлы станка представлена чертежами и 3D-моделями.

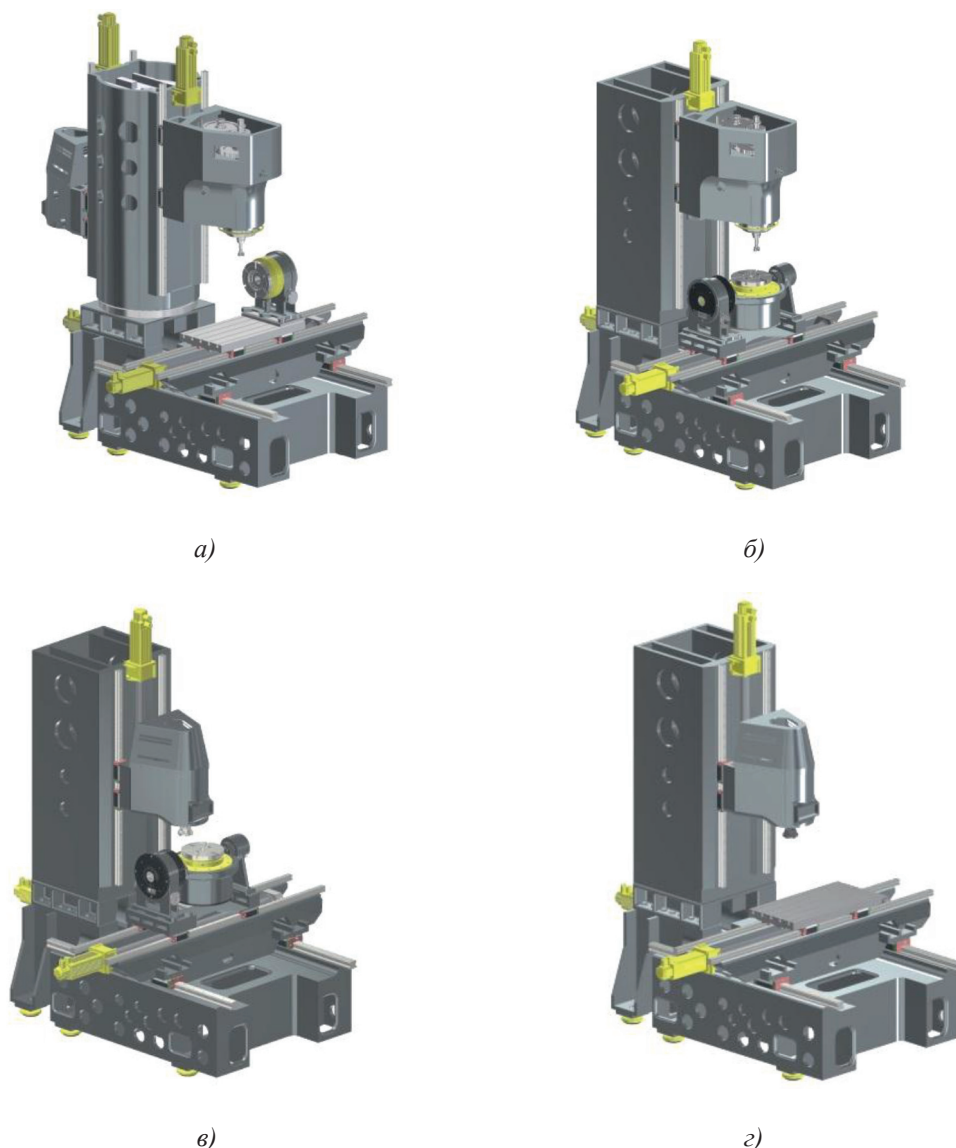


Рис. 5. Модульные компоновки: а) двухшпиндельный станок с поворотной стойкой и вертикальным поворотным столом; б) пятиосевой станок для силового резания; в) пятиосевой станок для скоростного резания; г) трехосевой станок для скоростного резания

Научной новизной предлагаемого проекта является новое компоновочное решение станка, использующее агрегатную поворотную модульную стойку, несущей две шпиндельные бабки с двумя шпиндельными узлами, имеющими принципиально различающиеся конструкторские решения, обеспечивающими сочетание в одной конструкции силового скоростного резания и высокоскоростной обработки. Для скоростного силового резания использован шпиндельный узел с автоматической коробкой скоростей. Для высокоскоростной обработки был спроектирован моторшпиндель с рубашечным охлаждением. Все принятые решения были подтвержде-

ны инженерными расчетами, выполненными с использованием современных систем проектирования и моделирования Autodesk Inventor и Ansys. Результаты их использования позволили уточнить конструктивные решения для всех элементов несущей системы станка.

Практическую ценность проекта составляют предложенные четыре варианта компоновки станка: трехосевая, четырехосевая и две пятиосевых. Это достигается за счет сочетания использования разных типов столов и шпиндельных узлов. Реализованный модульный принцип конструирования существенно снизил затраты на проектирование и создает ожидаемый экономический

эффект при реализации данного проекта на машиностроительном предприятии.

Дальнейшим развитием проекта является проведение топологической оптимизации для базовых деталей станка и рассмотрение их практической реализации с использованием или металлических 3D принтеров или литейных технологий.

Список литературы

1. Молодцов В.В. Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2016. 390 с.
2. Туромша В.И. Скоростное силовое фрезерование // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. 2012. № 3. С. 56–64.
3. Бреев С.В., Серебrenникова А.Г. Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов: 3. Высокоскоростное фрезерование // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. Т. 1. № 1(17). С. 47–51.
4. Технология цифровых прототипов: Autodesk Inventor 2010. Официальный учебный курс. М.: ДМК Пресс, 2010. 944 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://znanium.com/catalog/product/409046> (дата обращения: 12.03.2021).
5. Бриченков С.Н., Соколова И.Д. Исследование возможности использования поворотного стола на фрезерном станке // Инновационная наука. 2015. № 9 (9). С. 67–70.
6. Бушуев В.В., Молодцов В.В. Высокоскоростные мотор-шпиндели приводов главного движения металлорежущих станков // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3. С. 24–32.
7. Liu K., Liu Y., Sun M., Li X., Wu Y. Spindle axial thermal growth modeling and compensation on CNC turning machines Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 87. P. 2285–2292.
8. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфенов И.В. Прогнозирование тепловых характеристик станков для сложного режима работы // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 1 (48). С. 99–103.
9. Qiu J., Wu Y., Geng C., GE R. Investigation of Developing Cutting Performance of Economic CNC Lathe by Shorten the Spindle Transmission Link. Advances in Mechanical Design. ICMD 2017. Mechanisms and Machine Science. 2018. Vol. 55. P. 177–193.
10. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. Саратов: Профобразование, 2019. 640 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/87978.html> (дата обращения: 12.03.2021).