

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9.06
doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-4-11

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРЕТКИ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОГО СТАНКА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СУППОРТА ПРИ РЕВЕРСЕ

Михаил Владимирович Якимов^{1✉}, Александр Федорович Денисенко², Евгений Васильевич Лопатин³

^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

³ ООО «Средневожский станкозавод», Самара, Россия

¹ mikya@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5610-4142>

² sammortor@yandex.ru

³ le@svsz.ru

Аннотация

Рассмотрено явление пространственной переориентации суппорта станка при реверсе, вносящее дополнительные погрешности в точность обработки. Задачей исследования является оценка влияния ряда конструктивных особенностей каретки токарно-винторезного станка на ее крутильную жесткость при обеспечении стабильности пространственного положения суппорта при реверсе. Проведен ряд натурных экспериментов на станках токарной группы моделей 16Б16Ф3 и SAMAT-400SC «Вектор», а также выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния каретки суппорта при реверсе. Численные эксперименты с использованием КЭ моделирования в среде ANSYS для трех вариантов конструкции каретки: базовая конструкция, конструк-

ция с отсутствием ребер жесткости и конструкция с отсутствием ребер жесткости и «пятки». Анализ результатов показывает, что удаление из базовой конструкции каретки усилительных ребер и «пятки» с целью повышения технологичности приводит к некоторому снижению крутильной жесткости «моста» каретки и, как следствие, к повышению погрешности переориентации суппорта при реверсе. Однако, по сравнению с базовой конструкцией каретки это снижение незначительно и предлагаемое повышение технологичности каретки при исключении из конструкции ребер жесткости и «пятки» может быть реализовано.

Ключевые слова: пространственная переориентация, каретка, суппорт, станок, жесткость, элементы моделирование.

Ссылка для цитирования:

Якимов М.В. Повышение технологичности изготовления каретки токарно-винторезного станка при обеспечении стабильности пространственного положения суппорта при реверсе / М.В. Якимов, А.Ф. Денисенко, Е.В. Лопатин // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 3. – С. 4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-4-11.

Original article
Open Access Article

IMPROVING THE MANUFACTURABILITY OF THE CARRIAGE OF A TURNING AND SCREW-CUTTING MACHINE WHILE ENSURING THE STABLE SPATIAL POSITION OF THE REVERSAL HEAD

Mikhail Vladimirovich Yakimov^{1✉}, Aleksandr Fedorovich Denisenko², Evgeny Vasilyevich Lopatin³

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russia

³ Srednevolzhsky Machine Tool Factory, Samara, Russia

¹ mikya@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5610-4142>

² sammortor@yandex.ru

³ le@svsz.ru

Abstract

The phenomenon of spatial reorientation of the machine reversal head is considered, which introduces additional errors in the machining accuracy. The study objective is to evaluate the influence of some design features of a turning and screw-cutting machine carriage on its torsional stiffness while ensuring stable spatial position of the reversal head. A number of field experiments are carried out on turning machines of 16Б16Ф3 и SAMAT-400SC "Vector" models, as well as numerical simulation of the stress-strain state of the reversal head carriage. Numerical experiments using QE modeling in ANSYS environment for three carriage design options: a basic design, a design with no

stiffeners, and a design with no stiffeners and heel. The result analysis shows that the removal of stiffeners and heels from the basic carriage design in order to improve manufacturability leads to a slight decrease in the torsional stiffness of the carriage bridge and, as a result, to an increase in the error of reorientation of the reversal head. However, compared to the basic carriage design, this reduction is insignificant and the proposed improvement in the manufacturability of the carriage, while excluding stiffeners and heels from the design, can be implemented.

Keywords: spatial reorientation, carriage, head, machine tool, stiffness, elements of modeling.

Reference for citing:

Yakimov MV, Denisenko AF, Lopatin EV. Improving the manufacturability of the carriage of a turning and screw-cutting machine while ensuring the stable spatial position of the reversal head. *Transport Engineering*. 2025;3:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2025-3-4-11.

Введение

Суппортная группа токарных и токарно-винторезных станков в процессе эксплуатации работает в режиме многочисленных реверсивных движений. Универсальное оборудование, как правило, обеспечивает реверсирование в процессе наладочных перемещений, а автоматизированное оборудование, в том числе и станки с ЧПУ, выполняют такую процедуру в пределах автоматически выполняемого цикла, часто во время непосредственной обработки (снятия стружки). При этом, для станков с горизонтальным расположением плоскости направляющих вследствие особенностей компоновки привода подач возникает дополнительный силовой фактор в виде крутящего момента, обусловленного несовпадением вектора действия тяговой силы, приложенного вдоль оси ходового винта, и вектора силы трения (при холостых ходах) или вектора суммарной силы трения и силы резания (при рабочих ходах). Так как плоскость, в которой действует указанный дополнительный момент, имеет произвольное пространственное расположение относительно координатных плоскостей станка, то под его действием возникает пространственная переориентация суппорта станка при реверсе, вносящая дополнительные погрешности в точность обработки.

Поскольку для горизонтального расположения плоскости направляющих ха-

рактерна комбинация плоской и призматической направляющих, то наличие призматической направляющей приводит к появлению дополнительных реакций на каретку суппорта со стороны направляющих, вызывающих деформации кручения тела каретки вследствие различных углов поворота частей суппорта над плоской и призматической направляющей вокруг оси, совпадающей с осью ходового винта привода поперечных подач. Указанное явление подробно рассмотрено в работах [1, 2].

При угле 90° , образованном гранями передней направляющей, перекося суппорта над передней направляющей можно рассматривать в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, совпадающих с плоскостями граней направляющих, в каждой из которых происходит поворот суппорта.

Перекося в каждой грани направляющих с учетом контактных процессов при условии, что крылья суппорта (части каретки над каждой направляющей) абсолютно жесткие, то есть не подвергаются изгибу, будет определяться значениями зазоров Λ и значениями деформаций Δ по концам граней (рис. 1).

В результате суппорт после завершения переходного процесса при реверсе движения займет некоторое положение в пространстве относительно направляющих станины (рис. 1).

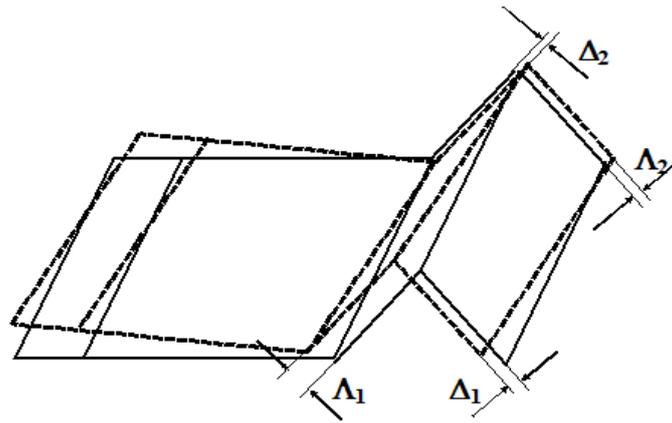


Рис. 1. Пространственное положение суппорта токарного станка при реверсе на горизонтальных направляющих
 Fig. 1. Spatial position of the lathe support during reversal on horizontal guides

Материалы, модели, эксперименты и методы

Экспериментальное определение пространственного положения суппорта можно оценивать по показаниям бесконтактных индуктивных датчиков или индикаторов с ценой деления 1 мкм, установленных по углам каретки суппорта, показывающих изменение расстояния между измерительной плоскостью датчика и шлифованными участками станины в точках, показанных на рис. 2.

Для станка мод. 16Б16Ф3 результаты измерений в точках № 1 и № 4 показаны на рис. 3.

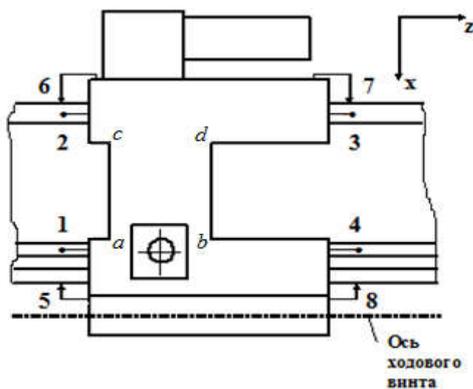


Рис. 2. Схема расположения датчиков (индикаторов) при замере пространственной переориентации суппортной группы при реверсе

Fig. 2. Layout of sensors (indicators) when measuring the spatial reorientation of the support group during reversal

Для станка «Вектор», имеющего унифицированную со станком мод. 16Б16Ф3 каретку, разница показания датчиков № 1 и № 4 после реверса при ручном

управлении лимбами перемещений по оси Z при многократном измерении составила ~6 мкм.

В работах [1, 2] на основании предложенной математической модели показана существенная роль жесткости «моста» каретки на пространственное положение суппортной группы при реверсе.

Поскольку, как показали эксперименты [1, 2], разница показания датчиков № 2 и № 3 на грани задней плоской направляющей при реверсе суппорта составляет доли микрометра, то деформацию «моста» каретки (угол закручивания) можно определить разницей показаний датчиков № 1 и № 4.

Жесткость «моста» каретки может быть рассчитана аналитически [3]. Однако, с помощью аналитических зависимостей сложно учесть конструктивные особенности, например, наличие усилительных ребер, имеющих на базовой конструкции каретки и составляющих значительные технологические сложности (рис. 2).

В связи с этим, для выбора конструкции, обеспечивающей достаточную жесткость каретки при повышении технологичности изготовления, были проведены численные эксперименты с использованием КЭ моделирования в среде ANSYS для трех вариантов конструкции каретки: базовая конструкция, конструкция с отсутствием ребер жесткости и конструкция с отсутствием ребер жесткости и «пятки» (рис. 4 и 5).

Показания датчиков, мкм

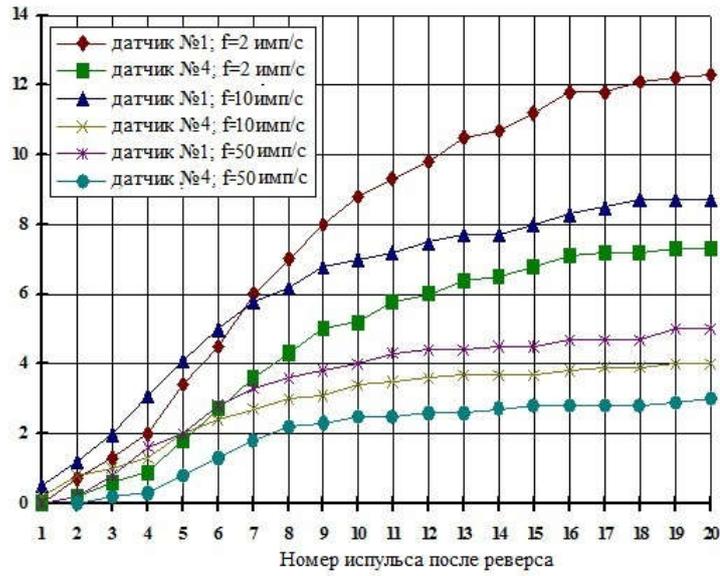


Рис. 3. Результаты измерений в точках № 1 и № 4 для станка мод. 16В16Ф3 в зависимости от скорости движения при реверсе
 Fig. 3. Results of measurements at points No. 1 and No. 4 for machine tool model 16В16Ф3 depending on the speed of movement during reversal

Геометрическая модель для расчета на крутильную жесткость включала в себя каретку соответствующей конструкции, на которую из силовых факторов действовала только тяговая сила. Модель каретки закреплялась от всех перемещений по плоскости задней направляющей.

Сравнение проводилось по значениям деформаций в направлении, перпендикулярном плоскости направляющих, в местах крепления «моста» каретки к ее крыльям (d рис. 2, точки a ; b ; c) (рис. 6–8).

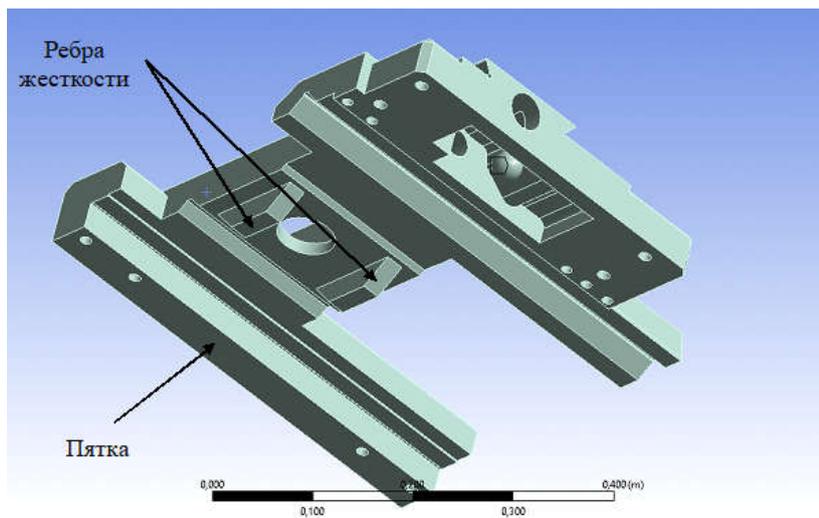


Рис. 4. Базовая конструкция каретки
 Fig. 4. Basic carriage design

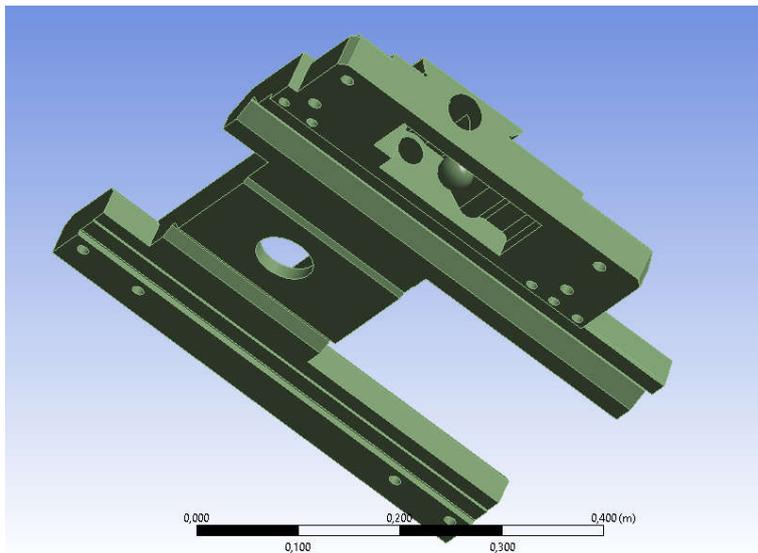


Рис. 5. Конструкция каретки после модернизации
Fig. 5. Carriage design after modernization

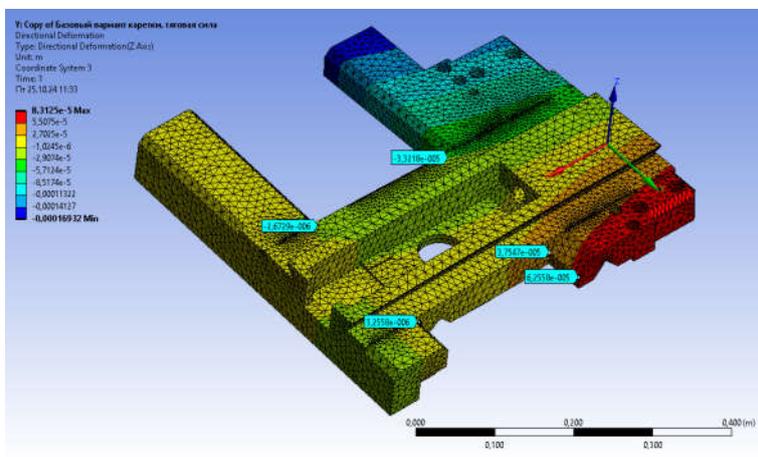


Рис. 6. Деформация «моста» базовой конструкции каретки
Fig. 6. Deformation of the "bridge" of the basic carriage design

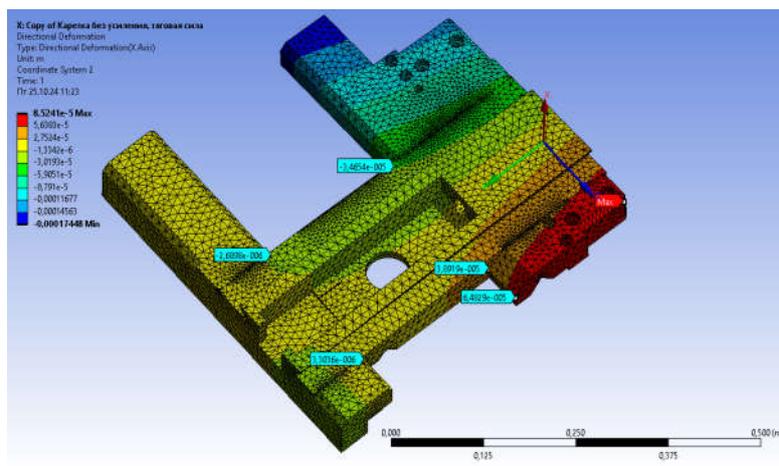


Рис. 7. Деформация «моста» 1-го варианта модернизированной конструкции каретки (без ребер жесткости)
Fig. 7. Deformation of the "bridge" of the 1st version of the modernized carriage design (without stiffeners)

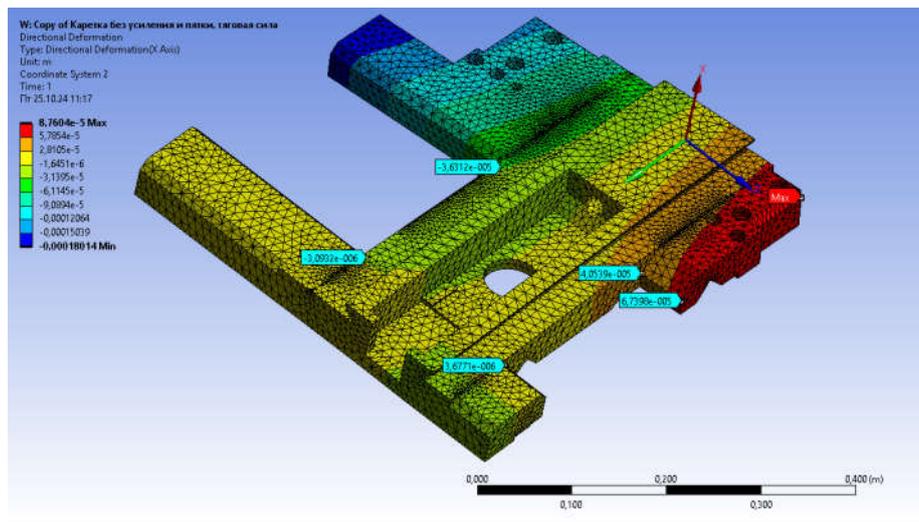


Рис. 8. Деформация «моста» 2-го варианта модернизированной (без ребер жесткости и «пятки») конструкции каретки
 Fig. 8. Deformation of the bridge of the 2nd version of the modernized (without stiffening ribs and "heel") carriage design

Результаты

Результаты моделирования представлены в таблице.

Учитывая знаки полученных значений, угол закручивания «моста» каретки может быть оценен по величине

$$\xi = |x_a - x_c| + |x_b - x_d|,$$

которая для базовой конструкции каретки составляет $\xi_B = 6,477 \cdot 10^{-5}$ м, а для модернизированной – $\xi_{M1} = 6,761 \cdot 10^{-5}$ м; $\xi_{M2} = 7,003 \cdot 10^{-5}$ м.

Таблица

Смещение узлов КЭ сетки по оси x в точках a; b; c; d (рис. 2), м

Table

Displacement of CE grid units along x axis at points a; b; c; d (Fig. 2), m

Точка	Базовая конструкция каретки	1-ый вариант модернизированной конструкции каретки	2-ой вариант модернизированной конструкции каретки
a	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-5}$
b	$-3,32 \cdot 10^{-5}$	$-3,47 \cdot 10^{-5}$	$-3,63 \cdot 10^{-5}$
c	$3,26 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$3,68 \cdot 10^{-6}$
d	$-2,67 \cdot 10^{-6}$	$-2,69 \cdot 10^{-6}$	$-3,09 \cdot 10^{-6}$

Заключение

Таким образом, анализ результатов показывает, что удаление из базовой конструкции каретки усилительных ребер и «пятки» с целью повышения технологичности приводит к некоторому снижению крутильной жесткости «моста» каретки и, как следствие, к повышению погрешности переориентации суппорта при реверсе. Однако, по сравнению с базовой конструкцией каретки при удалении ребер жесткости (1-ый вариант модернизированной

конструкции каретки) снижение жесткости составляет всего 4,4 %, а при удалении ребер жесткости и «пятки» (2-й вариант модернизированной конструкции каретки) – 8,1 %. Таким образом предлагаемое повышение технологичности каретки за счет исключения из конструкции ребер жесткости и «пятки» может быть реализовано без существенной потери стабильности пространственного положения суппорта при реверсе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Денисенко, А.Ф. Повышение точности металло-режущих станков на основе анализа и синтеза технологических систем: моногр. /А.Ф. Денисенко, В.Л. Зубенко; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 1999. 268 с.
2. Alexander Denisenko. Spatial reorientation of the carriage of a CNC lathe when reversing / MATEC

REFERENCES

1. Denisenko AF, Zubenko VL. Improving the accuracy of metal-cutting machines based on the analysis and synthesis of technological systems: monograph. Samara: Samara State Technical University; 1999.
2. Denisenko AF. Spatial reorientation of the carriage of a CNC lathe when reversing / MATEC Web of

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балабанов, А.Н. Технологичность конструкций машин / А.Н. Балабанов. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
2. Денисенко, А.Ф. Анизотропия радиальной жесткости расточки корпуса под опоры шпинделя токарного станка / А.Ф. Денисенко, М.В. Якимов, К.Р. Борисова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 5(102). – С. 23-31.
3. Довнар, С.С. МКЭ-анализ жесткости суппорта тяжелого токарного станка в статике и динамике / С. С. Довнар [и др.] // Машиностроение. – 2018. – Вып.31. – С. 187-196.
4. Жиганов, В.И. Особенности построения геометрической модели для расчета динамических характеристик несущей системы токарного станка модели УТ-16 / В.И. Жиганов, Р.Ш. Халимов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – №3 (10). – С. 69-73.
5. Кульга, К.С. Повышение эффективности проектирования компоновок многоцелевых станков

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. Balabanov AN. Manufacturability of machine designs. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
2. Denisenko AF, Yakimov MV, Borisova KR. Radial stiffness anisotropy of body boring for lathe spindle bearings. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021;5(102):23-31.
3. Dovnar SS. FEM-analysis of the rigidity of the heavy lathe head in statics and dynamics. Mashinostroenie (Mechanical Engineering). 2018;31:187-196.
4. Zhiganov VI, Khalimov RSh. Features of constructing a geometric model for calculating the dynamic characteristics of the bearing system of a UT-16 lathe model. Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2009;3(10):69-73.

Web of Conferences 329, 03053 (2020) – doi: org/10.1051/mateconf/202032903053.

3. Денисенко, А.Ф. Прогнозирование критериев работоспособности станков на основе конструкторско-технологического обеспечения эксплуатационных свойств соединений: дис. ... док. техн. наук.- Самарский гос. тех. ун-т, Самара, 2000.

Conferences 329, 03053. 2020. doi: org/10.1051/mateconf/202032903053.

3. Denisenko AF. Forecasting criteria for machine tool operability based on design and technological support for the operational properties of compounds [dissertation]. [Samara (RF)]: Samara State Technical University; 2000.

с ЧПУ на основе CAD/CAE-систем / К.С. Кульга, П.В. Виноградов, А.А. Гаитова // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 14-18.

6. Поляков, А.Н. Реализация параметрических моделей в инженерном анализе металлорежущих станков / А.Н. Поляков, С.В. Каменев, В.Н. Михайлов // Технология машиностроения. 2007. №3. С. 20-23.
7. Поляков, А.Н. Расчет несущих систем станков в САЕ - системе ANSYS: Учебное пособие / А.Н. Поляков, С.В. Каменев, К.С. Романенко – Оренбург: ОГУ, 2013. – 190 с.
8. Хусаинов Р.М. Применение CAD/CAE-систем для исследования характеристик жесткости несущих систем металлорежущих станков / Р.М. Хусаинов, Д.Р. Ахкиямов // Материалы XXVII междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки - от теории к практике». Часть I. Новосибирск: СибАК. – 2013. – <https://sibac.info/conf/tech/xxvii/34591> (дата обращения 14.05.2024).

5. Kulga KS, Vinogradov PV, Gaitova AA. Improving the efficiency of designing layouts of multipurpose CNC machines based on CAD/CAE systems. Russian Engineering Research. 2016;7:14-18.
6. Polyakov AN, Kamenev SV, Mikhailov VN. Implementation of parametric models in the engineering analysis of metal-cutting machines. Tekhnologiya Mashinostroeniya. 2007;3:20-23.
7. Polyakov AN, Kamenev SV, Romanenko KS. Calculation of machine tool bearing systems in ANSYS-SAE system: textbook. Orenburg: OSU; 2013.
8. Khusainov RM, Akhkiyamov DR. Application of CAD/CAE systems to study the stiffness characteristics of bearing systems of metal-cutting machines

[Internet]. Proceedings of the XXVII International Scientific and Practical Conference, 2013 [cited 2024 May 14]: Technical Sciences - from Theory to

Practice; Novosibirsk: SibAK; 2013. Available from: <https://sibac.info/conf/tech/xxvii/34591>.

Информация об авторах:

Якимов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», тел. 89171166598.

Денисенко Александр Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры

Yakimov Mikhail Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, phone: 89171166598.

Denisenko Aleksandr Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Tech-

«Технология машиностроения, станки и инструменты», тел. 89276540435.

Лопатин Евгений Васильевич – руководитель конструкторско-технологического центра, тел. 89277005556.

nology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, phone: 89276540435.

Lopatin Evgeny Vasilyevich – Head of the Design and Technology Center, phone: 89277005556.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 03.02.2025; одобрена после рецензирования 15.02.2025; принята к публикации 27.02.2025. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 03.02.2025; approved after review on 15.02.2025; accepted for publication on 27.02.2025. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.