

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ШАРИКО-ВИНТОВОГО МЕХАНИЗМА НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО УЗЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Соловьев В.М., Кудрявцев И.В., Колотов А.В., Трошин С.И., Митяев А.Е.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: прецизионный узел, шарико-винтовой механизм, особенности работы, внешние факторы, погрешность, натяг, жесткость, зазор, температура.

Аннотация. Для обеспечения точности позиционирования в конструкции прецизионного линейного модуля широко используется шарико-винтовой механизм, который сочетает высокий КПД, плавность хода и высокое быстродействие. Для управления позиционированием каретки шарико-винтового механизма обычно используется шаговый двигатель с микроконтроллером, который работает по заданной программе, поэтому ошибками расположения его вала пренебрегаем. В данной работе проводится анализ влияния различных факторов на точность позиционирования прецизионного линейного модуля: жесткость элементов передачи, материал, натяг и др. Особое внимание уделено кинематической погрешности винтовой пары механической передачи, которая складывается из жесткости элементов, зазоров и влияния температуры. Выполнен аналитический расчет погрешности винтовой пары применительно к разработанному прецизионному модулю от каждого из рассмотренных факторов и проведен анализ вклада каждой составляющей в общее отклонение. Предложены способы повышения точности позиционирования каретки и метод экспериментального определения накопленной погрешности, который основывается на циклическом движении исполнительного органа. Полученные результаты можно использовать для проектирования, модификации и регулировки высокоточных робототехнических систем и станков ЧПУ, где требуется обеспечение жестких допусков точности позиционирования при длительной эксплуатации.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE BALL-SCREW MECHANISM FEATURES ON THE ACCURACY OF POSITIONING OF THE PRECISION DISPLACEMENT UNIT

Solovyuk V.M., Kudryavtsev I.V., Kolotov A.V., Troshin S.I., Mityaev A.E.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: precision unit, ball-screw mechanism, peculiarities of operation, external factors, error, interference, stiffness, clearance, temperature.

Abstract. In order to improve the accuracy of positioning, a ball-screw mechanism is often used in the design of a precision linear module. To control the positioning of the carriage of the ball-screw mechanism, a stepper motor with a microcontroller is used, which operates according to a given program, so errors in the location of its shaft are neglected. The study analyzes the influence of various factors on the positioning accuracy of a precision linear module: type of transmission, material, interference, etc. Particular attention is paid to the kinematic error of the screw pair of the mechanical transmission, which consists of the rigidity of the elements, gaps and the influence of temperature. An analytical calculation of the screw pair error was performed in relation to the developed precision module from each of the factors considered and the contribution of each component to the total deviation was analyzed. Methods are proposed to increase accuracy of carriage positioning and method of experimental determination of accumulated error, which is based on cyclic movement of actuating element. The results obtained can be used to design, modify and adjust high-precision robotic systems and CNC machines, where strict tolerances are required during long-term operation.

Введение

Прецизионный модуль линейного перемещения на основе шарико-винтовом механизме [1, 2] является важной составляющей многих исполнительных систем и позволяет преобразовывать вращательное движение шагового двигателя в линейное перемещение каретки (рис 1). Шарико-винтовой механизм (ШВМ), муфта и шаговый двигатель в совокупности обеспечивают точное и надежное перемещение объектов и применяются в различных отраслях, включая промышленность, робототехнику, автоматизацию и многие другие [3]. Преимуществами ШВМ являются высокая нагрузочная способность при малых

габаритах, большая долговечность, высокая осевая жесткость и точность перемещений, плавность хода и бесшумность работы, высокий КПД.

Ходовые винты ШВМ выполняются со стандартной резьбой трапецеидального профиля, угол профиля 30° (ISO 3408-1:2020 Ball screws – Part 1: Vocabulary and designation. 4th ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2020). Преимуществом этой резьбы перед резьбой прямоугольного профиля является возможность ее фрезерования и шлифования; недостатком – возникновение

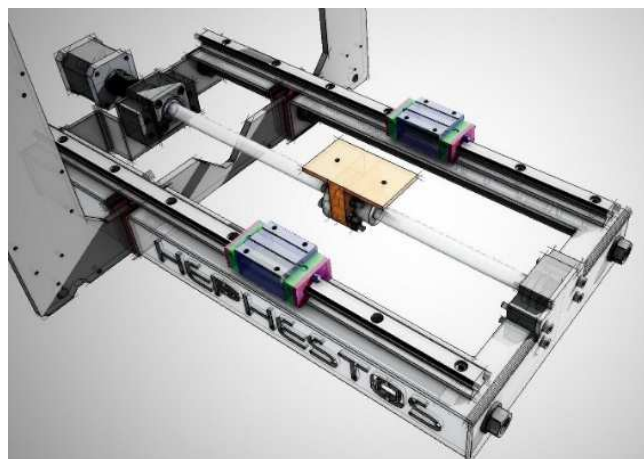


Рис. 1. Пример прецизионного модуля

погрешностей шага при радиальном биении ходового винта станка и поперечных колебаний от прогиба под действием собственного веса. В связи с этим в прецизионных станках применяют резьбы с меньшим углом профиля ($10\text{--}20^\circ$). Другим направлением повышения точности винтовых передач является применение в гайке центрирующих втулок [4].

Для регулирования и устранения зазора в резьбе гайку выполняют из двух частей, одна из которых неподвижно прикреплена к столу или суппорту, а другая может смещаться в осевом направлении. Изменяя толщину прокладки, установленной между гайками, в ШВМ можно полностью устранить зазор. Однако в процессе эксплуатации или изнашивания резьбы гаек и винта необходимо периодически производить регулировки. Применяют и другой способ устранения зазора в ШВМ, когда при неизменном осевом расположении гаек изменяется их относительное угловое положение (ISO 3408-3:2021 Ball screws – Part 3: Acceptance tests and acceptance code. 3rd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2021).

В данной работе исследуются основные факторы, определяющие погрешность позиционирования каретки прецизионного модуля, такие как точность шарико-винтового механизма, влияние температуры и углового смещения. Для численной оценки используются разработанные методы расчета, которые позволяют определить вклад каждой компоненты в общую погрешность.

1. Постановка задачи

Рассмотрим прецизионный модуль линейного перемещения на основе шарико-винтового механизма, который приводится в движение с помощью шагового двигателя Nema [5]. Шаговый двигатель использован для исключения его влияния на результат, так как такой тип двигателя обеспечивает высокую точность позиционирования, поскольку имеет возможность фиксировать свое положение в требуемый момент времени без использования дополнительных приспособлений. Управление двигателем осуществляется с помощью микроконтроллера Arduino Mega 2560, который построен на микроконтроллере ATmega2560 с использованием специальной библиотеки GStepper. Драйвер TB6600 в данной системе используется для преобразования сигналов микроконтроллера в движение шагового двигателя. Подключение микроконтроллера к драйверу было осуществлено по схеме с общим анодом.

Поскольку влияние погрешности позиционирования вала двигателя на положение каретки нами исключена, то рассмотрим другие причины погрешности, а именно кинематическую точность шарико-винтового механизма, которая зависит от следующих факторов [6].

- Геометрические параметры и погрешности изготовления: точность шага резьбы, угол подъема резьбы, качество профиля канавок.

- Конструктивные особенности: наличие люфта и предварительного натяга, способ изготовления (шлифованные или катанные винты).

– Эксплуатационные и монтажные факторы: ошибки монтажа (эксцентриситет винта относительно опор), жесткость системы, тепловое расширение.

Рассмотрим данные факторы и их влияние на погрешность позиционирования каретки более подробно.

1.1. Оценка натяга шарико-винтового механизма

Геометрическая точность сопряжения винтовых поверхностей определяется зазором между поверхностями в их теоретическом положении [7]. Так как нас интересует точность перемещения гайки вдоль оси винта, то следует рассматривать функцию осевого зазора вдоль оси винта. В резьбовом соединении винт – гайка совместим оси сопряженных поверхностей и начало координат винтовой поверхности резьбы и гайки от начала координат винтовой поверхности винта поместим на расстоянии $p\Delta\theta$ (рис 2,а), где p – шаг резьбы, $\Delta\theta$ – отклонение в углах подъема резьбы винта и гайки.

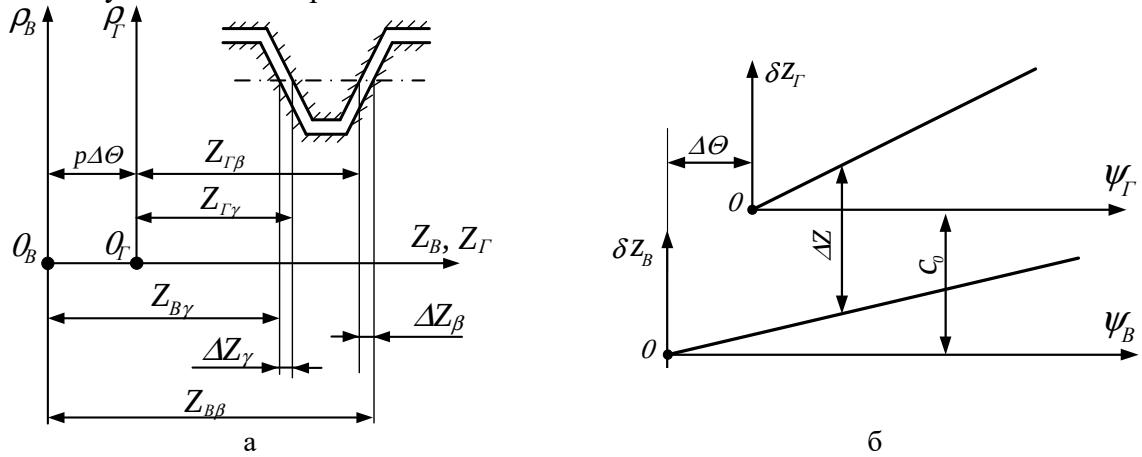


Рис. 2. Особенности пары винт-гайка шарико-винтового механизма: а) геометрическое сопряжение; б) кинематическая погрешность

Характер резьбового сопряжения определяется разностью положений образующих винтовых поверхностей винта и гайки по длине свинчивания. В резьбовых сопряжениях винт – гайка, предназначенных для перемещений, обеспечивается гарантированный осевой зазор C_0 за счёт разности их средних радиусов:

$$C_0 = (r_{\Gamma 0} - r_{B 0}) \cdot \operatorname{tg} \beta_0, \quad (1)$$

где $r_{\Gamma 0}$, $r_{B 0}$ – номинальные значения среднего радиуса винта и гайки, β_0 – номинальный угол профиля резьбы винта.

Зазор C_0 необходим для смазки, компенсации температурных деформаций, сопряжения резьбы и т.д. В процессе эксплуатации передачи зазор выбирается в одну сторону. Уравнение связи между точками поверхности, лежащими на прямой, параллельной оси пары:

$$\Delta Z_{\gamma} = P \cdot \Delta \theta + Z_{\Gamma \gamma} + Z_{B \gamma}. \quad (2)$$

где $Z_{\Gamma \gamma}$, $Z_{B \gamma}$ – расстояния от точки O_{Γ} до поверхностей профиля гайки и винта соответственно, ΔZ_{γ} – расстояние между точками поверхностей профиля.

Расположим поверхности винта и гайки так, чтобы между ними образовался гарантированный основной зазор C_0 , в этом случае из выражения (1) получим:

$$C_0 = \Delta Z_{\gamma} = p \cdot \Delta \beta + Z_{\Gamma \gamma} - Z_{B \gamma}, \quad (3)$$

Согласно определению ошибок положения и опуская индекс γ , будем иметь значение зазора для некоторого фиксированного относительного положения образующих поверхностей в виде:

$$\Delta Z = C_0 + \delta Z_{\Gamma} + \delta Z_{B}, \quad (4)$$

где δZ_{Γ} , δZ_{B} – отклонения (ошибки) положения поверхностей профиля гайки и винта соответственно.

Предположим, что каждое отклонение δZ_r , δZ_b определяются прогрессирующей погрешностью угла профиля резьбы, которые обозначим ψ_r и ψ_b соответственно. Для геометрической интерпретации выражения (4) расположим системы координат согласно рисунок 2, б. Расстояние между точками графиков $\delta Z_r(\psi_r)$ и $\delta Z_b(\psi_b)$, измеренное по перпендикуляру к оси $O\psi_r$ и $O\psi_b$, будет определять функцию зазора ΔZ . Для получения функции зазора составим систему уравнений, связывающую системы координат гайки и винта:

$$\begin{cases} \psi_b = \psi_r + \Delta\theta; \\ \Delta Z_b = C_0 + \delta Z_r. \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему (5), получим функцию зазора или уравнение геометрической точности сопряжённой винтовой пары:

– в системе координат, связанно с винтом

$$\Delta Z(\psi_b, \Delta\theta) = C_0 + \delta Z_r(\psi_b - \Delta\theta) - \delta Z_b(\psi_b); \quad (6)$$

– в системе координат, связанно с гайкой

$$\Delta Z(\psi_r, \Delta\theta) = C_0 + \delta Z_r(\psi_r) - \delta Z_b(\psi_r + \Delta\theta). \quad (7)$$

При $\Delta Z > 0$ между текущими точками сопряжённых образующих профиля резьбы винта и гайки имеет место зазор, а при $\Delta Z < 0$ имеем натяг.

Уравнения (6), (7) позволяют определить характер резьбового сопряжения в любом сечении, определяемом прогрессирующей погрешностью ψ_b или ψ_r на длине свинчивания при любом относительном положении гайки и винта, определяемом отклонением угла подъема винта $\Delta\theta$. Наибольшее и наименьшее значения функции $\Delta Z = \Delta Z(\psi, \Delta\theta)$ будут определять предельные значения зазора и натяга на длине ходового винта.

1.2. Оценка влияния жесткости и зазора

Погрешность позиционирования, вызванная осевой жесткостью ШВМ определяется как разница осевого смещения ходового винта по длине хода каретки. Осевую жесткость винта можно определить как [8]:

$$K_s = \frac{A \cdot E}{L} = \frac{\pi \cdot d^2 E}{4L}, \quad (8)$$

где A – площадь поперечного сечения ходового винта; d – диаметр резьбы винта по впадинам; E – модуль Юнга.

Осевое смещение, вызванное осевой жесткостью ходового винта, определится как:

$$\delta_a = \frac{F_a}{K_s}, \quad (9)$$

где F_a – нагрузка каретки.

Погрешность позиционирования, вызванная осевой жесткостью системы винтовой подачи, будет определяться как:

$$\delta_a = \delta_{a2} - \delta_{a1}. \quad (10)$$

где δ_{a1} и δ_{a2} – осевые смещения в начале и в конце хода каретки.

Радиальное биение по окружности резьбовой канавки относительно оси опорного участка ходового винта можно определить как:

$$\delta_{r1} = \delta_{r0} + \Delta\delta_r, \quad (11)$$

где δ_{r0} – стандартное значение для используемого класса точности, $\Delta\delta_r$ – величина поправки:

$$\Delta\delta_r = \frac{l_1 \cdot \delta_{r2}}{H}, \quad (12)$$

где H – общая длина хода винта, l_1 – расстояние между опорой вала и точкой измерения, δ_{r2} – полное радиальное биение по оси ходового винта.

Осевое δ_a и радиальное δ_r смещения характеризуют общее смещение каретки вследствие жесткости и точности механической системы винта.

1.3. Оценка влияния углового смещения

Под угловым смещением понимается погрешность угла подъема винтовой линии с учетом наличия зазоров в механической паре, которая приводит к тому, что при одном и том же угле поворота винта гайка проходит разное расстояние на разных участках и к непараллельности оси винта и

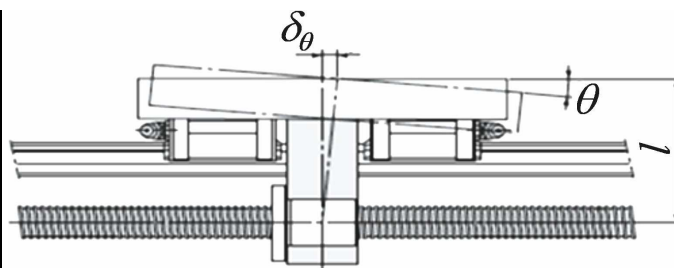


Рис. 3. Схема углового смещения

оси движения направляющих, а также неперпендикулярность плоскости крепления гайки к оси винта. Схема анализа изменения ориентации каретки вследствие углового смещения показана на рисунке 3, где δ_θ – точность позиционирования по углу наклона, мм; l – расстояние по нормали от центра ШВМ; θ – угол наклона (перекоса).

Геометрический анализ схемы показывает, что погрешность позиционирования по углу наклона можно определить как:

$$\delta_\theta = l \cdot \sin \theta. \quad (13)$$

При малых углах наклона θ синус угла приближенно равен самому углу в радианах.

1.4. Оценка влияния температуры

Изменение температуры вызывает тепловую деформацию винта, которая приводит к увеличению фактического шага резьбы и точности позиционирования [9-11]. Основной причиной нагрева является трение в зонах контакта с канавками винта и гайки, особенно при высоких скоростях и большом предварительном натяге. Ошибку перемещения можно оценить по формуле:

$$\delta_t = \alpha \cdot L \cdot \Delta T. \quad (14)$$

где α – коэффициент теплового расширения, L – рабочая длина винта, ΔT – изменение температуры.

Выполним расчеты погрешностей применительно к имеющейся конструкции мехатронной системы.

2. Результаты

Выполним численный расчет погрешностей позиционирования каретки ШВМ прецизионного модуля от рассмотренных выше факторов. Пусть масса груза 1000Н, масса стола 500 Н, диаметр резьбы по впадинам $d = 14$ мм, рассматриваются два положения ходового винта: при $L_1 = 0,1$ м и $L_2 = 0,9$ м, длина хода $H = 0,8$ м, модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Осевые смещения, вызванные осевой жесткостью ходового винта, при L_1 и L_2 :

$$\delta_{a1} = \frac{F_a}{K_{S1}} = \frac{4L_1F_a}{\pi d^2 E} = 2 \text{ мкм}, \quad \delta_{a2} = \frac{F_a}{K_{S2}} = \frac{4L_2F_a}{\pi d^2 E} = 17,6 \text{ мкм}. \quad (15)$$

Общая погрешность позиционирования, вызванная осевой жесткостью винтового механизма:

$$\delta_a = \delta_{a2} - \delta_{a1} = 17,6 - 2 = 15,6 \text{ мкм}. \quad (16)$$

Радиальное биение по окружности резьбовой канавки относительно оси опорного участка ходового винта:

$$\Delta\delta_r = \frac{L_1 \cdot \delta_{r2}}{H} = \frac{0,1 \cdot 0,012}{0,9} = 0,013 \text{ мкм}. \quad (17)$$

Погрешность точности позиционирования поверхности винта:

$$\delta_r = \delta_{r0} + \Delta\delta_r = 0,012 + 0,013 = 0,025 \text{ мкм}. \quad (18)$$

где $\delta_{r2} = 0,12$ мкм – общее радиальное биение по оси ходового винта.

Определим влияние погрешности позиционирования по углу наклона, приняв угол наклона 1° :

$$\delta_{\theta} = l \cdot \sin \theta = 0,05 \cdot \sin 1^{\circ} = 873 \text{ мкм.} \quad (19)$$

Оценим температурную деформацию передачи при $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$:

$$\delta_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot L_1 = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 20 \cdot 0,1 = 24 \text{ мкм.} \quad (20)$$

Результатирующее смещение каретки от теоретического положения будет определяться векторной суммой найденных отклонений:

$$\vec{\delta}_{\Sigma} = \vec{\delta}_a + \vec{\delta}_r + \vec{\delta}_{\theta} + \vec{\delta}_t. \quad (21)$$

Далее проведем анализ полученных в (21) значений.

3. Обсуждение

В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на точность позиционирования каретки прецизионного модуля на основе шарико-винтового механизма, которые основаны на особенностях его конструкции и работы. Наиболее значимым оказалось угловое отклонение, которое вследствие относительно большого плеча приводит наибольшим линейным погрешностям положения каретки. В этом случае проблему необходимо решать конструктивными методами: уменьшением плеча, натягом, увеличением длины гайки.

Влияние температуры также оказалось весьма значимым и необходимо принимать меры для поддержания комнатной температуры в трущихся элементах шарико-винтового механизма. Существует несколько способов снижения температурной погрешности [11]:

1. Предварительное растяжение: при монтаже винт фиксируется в опорах с натяжением, превышающим ожидаемое тепловое расширение. Это удерживает шаг стабильным при нагреве.

2. Полые винты с охлаждением: Прокачка охлажденного масла или воздуха через центральное отверстие винта для поддержания постоянной температуры.

3. Программная компенсация: ЧПУ-система вводит корректировки в режиме реального времени, используя датчики температуры или математические модели нагрева.

4. Снижение тепловыделения: уменьшение предварительного натяга на ШВМ и на опорном подшипнике, увеличение шага ШВМ и снижение частоты вращения, подбор соответствующей смазки.

Влияние остальных факторов весьма мало и ими можно пренебречь. Предметом дальнейших исследований может быть накопленная погрешность шарико-винтового механизма при его непрерывном циклическом движении. Для исследования накопленной погрешности предполагается провести большое количество экспериментов, чтобы эмпирическим путем определить, насколько при циклическом движении каретки происходит ее отклонение от заданного программой положения. Предварительные эксперименты в этом направлении показывают, что накопленная погрешность не обнаруживается при малоцикловом движении и требуется проведение многоцикловых испытаний [12], что является следующим этапом исследования.

Заключение

В ходе исследования были определены основные факторы, определяющие погрешность позиционирования каретки прецизионного модуля на основе ШВМ и предложены методы расчета для оценки их влияния. Установлено, что ШВМ обеспечивает высокую точность позиционирования, при этом наиболее значимым фактором является угловая погрешность положения каретки и температура.

Список литературы / References

1. Stoica A., Stan G., Drob C. Increasing the positioning accuracy of the feed kinematic linkages of CNC machine tools through the calibration method // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 245-250. doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.2.245.
2. Alshehhi A., Rosyid A., El-Khasawneh B. Design and Analysis of a Parallel Kinematics Machine Tool with Improved Workspace // 18th International conference on control, automation, robotics and vision: Conference proceedings. – Dubai: IEEE, 2024. Vol. 1. – P. 511-518.

3. Xu M., Li C., Zhang H., Liu Z., Zhang Y. comprehensive nonlinear dynamic model for ball screw feed system with rolling joint characteristics // Nonlinear Dynamics. 2021. vol. 106, no. 1, pp. 169-210. doi.org/10.1007/s11071-021-06815-3.
4. Jiang Z., Yang S. Precision Machines – Singapore: Springer Nature, 2020. – 600 p.
5. Khairudin M., Asnawi R., Shah A. The characteristics of TB6600 motor driver in producing optimal movement for the Nema23 stepper motor on CNC machine // Telkomnika. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 343-350. doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v18i1.12781.
6. Brecher C., Weck M. Machine Tools Production Systems 2: Design, Calculation and Metrological Assessment – Cham: Springer Nature Switzerland, 2021. – 840 p.
7. Bosch Rexroth AG. Linear Motion Technology Handbook – Würzburg: Vogel Business Media, 2017. – 320 p.
8. Ugural A.C. Mechanical Design of Machine Components – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 612 p.
9. Lei L., Li B., Wang H., Huang G., Xuan F. High-temperature high-cycle fatigue performance and machine learning-based fatigue life prediction of additively manufactured Hastelloy X // International Journal of Fatigue. 2024, vol. 178, p. 108012. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108012.
10. Ma C., Liu J. High-Speed precision CNC machine tools: the theory and methods of thermal behavior simulation and control – Cambridge: Elsevier, 2025. – 300 p.
11. Chen G., Wang K. C. Real-time thermal error compensation of machine tools based on machine learning model and actual cutting measurement via temperature sensors // Sensors and Materials. 2024, vol. 36, no. 10, pp. 4221-4238. doi.org/10.18494/SAM5110.
12. Shin J.H., Ni Z. Investigation of the reliability and sensitivity of wear-induced accuracy degradation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1043, p. 032069. doi.org/10.1088/1757-899X/1043/3/032069.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Соловьев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики	Solovyuk Vladimir Mikhailovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of applied mechanics
Кудрявцев Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики	Kudryavtsev Ilya Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of applied mechanics
Колотов Андрей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики	Kolotov Andrey Vasilievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of applied mechanics
Трошин Сергей Иванович – старший преподаватель кафедры прикладной механики;	Troshin Sergey Ivanovich – senior lecturer of the Department of applied mechanics
Митяев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики	Mityaev Alexander Evgenievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of applied mechanics
kudrilya@rambler.ru	

Получена 29.04.2026