

СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Применение сложных траекторий движения формообразования при торцевом фрезеровании Ю.Е. Петухов, П.В. Домнин, П.К. Добышев	8
Особенности осаждения нитридных PVD покрытий на детали из алюминиевых сплавов А.А. Верещака, Е.С. Сотова, П.Ю. Потапов, И.М. Шмаков, Т. Н. Боровик	20
Разработка основ методологии конструкторско-технологического проектирования волновых механизмов А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов	37
Применение дополнительных электродов для процесса плазменно-электролитной обработки В.А. Гапонов, Д.Цой, И.В. Суминов	53
Определение влияния динамических характеристик станка на траекторию рабочего органа В.Р. Хабиров, Ф.С. Сабиров	61
Влияние параметров сборного инструмента с радиально-подвижными блоками на точность внутреннего шлифования эллипсоидных поверхностей В.А. Яшков, Л.Г. Никитина	66

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Технологическое обеспечение надежности манжетных уплотнений посредством разработки методики выбора рациональных режимов FDM-печати А.А. Кутин, И.В. Белоусов, А.С. Краско, Д.А. Кузнецов	76
Метод расчёта размера компенсатора при выполнении пригоночных работ без определения величины поправки В.П. Вороненко, С.В. Луцук	89

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Дисперсии воспроизводимости экспериментов при исследовании операций холодной объемной штамповки А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова	100
Исследование равноканального углового прессования алюминиевого деформируемого сплава в матрице с углом пересечения каналов 60° Е.Н. Полосин, Е.Н. Сосенушкин, С.В. Любимский	114

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

3D парадигма моделирования в вибрационной диагностике шпиндельных узлов С.И. Досько, А.Г. Ширшов	132
Разработка ПО для оценки технологичности изделий по STEP-моделям при 2.5D-фрезеровании И.М. Пахомов, А.В. Козлова	144
Цифровой двойник пятикоординатного обрабатывающего центра: концептуальная архитектура, модульный состав и принципы построения Я.И. Пимушкин, Д.Ю. Прокопович	155
Принципы построения модуля автоматизированного выбора компоновок агрегатных станков по параметрам обрабатываемой заготовки А.С. Далечин, Д.С. Пех, А.Н. Феофанов	168

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Динамическая коррекция управления БПЛА в режиме нелинейной стабилизации полетного параметра А.И. Хохлов, М.М. Стебулянин	177
Синтез и кинематические характеристики 6R механизмов на основе комбинации для применения в робототехнике В.В. Малкова, Л.Ф. Хабибуллина, Ф.Ф. Хабибуллин	187

VESTNIK MSUT «Stankin»

No 2 (77) 2026

CONTENTS

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Application of complex trajectories of shaping motion in face milling Y.E. Petukhov, P.V. Domnin, P.K. Dobyshev.....	8
Features of nitride PVD coating deposition on aluminum alloy parts A.A. Vereshchaka, E.S. Sotova, P.Yu. Potapov, I.M. Shmakov, T.N. Borovik.....	20
Development of the fundamentals of the methodology for design and technological development of harmonic mechanisms A. N. Sobolev, A. Ya. Nekrasov.....	37
Use of additional electrodes for the process of plasma electrolyte treatment V.A. Gaponov, D. Tsoy, I.V. Suminov	53
Determining the influence of machine dynamic characteristics on the trajectory of the tool V.R. Khabirov, F. . Sabirov	61
The influence of the parameters of an assembly tool with radially movable blocks on the accuracy of internal grinding of ellipsoidal surfaces V.A. Yashkov, L.G. Nikitina	66

TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

Technological support for the reliability of lip seals through the development of a methodology for selecting rational FDM printing modes A.A. Kutin, I.V. Belousov, A.S. Krasko, D.A. Kuznetsov.....	76
Method of calculating the compensator size during fitting operations without determining the correction value V.P. Voronenko, S.V. Lutsyuk	89

TECHNOLOGIES AND MACHINES FOR PRESSURE PROCESSING

The variances of reproducibility of experiments in the study of cold volumetric stamping operations

A.M. Dmitriev, N.V. Korobova..... 100

Study of equal-channel angular pressing of deformable aluminum alloy in a matrix with a channel intersection angle of 60°

E.N. Polosin, E.N. Sosenushkin, S.V. Lyubimsky 114

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

3D paradigm for modeling and vibration diagnostics of spindle units

S.I. Dosko, A.G. Shirshov..... 132

Development of software for assessing part manufacturability based on STEP-models in 2.5D-milling

I.M. Pakhomov, A.V. Kozlova 144

Digital twin of a five-axis machining center: conceptual architecture, modular structure, and design principles

Ya.I. Pimushkin, D.Yu. Prokopovich 155

Principles of designing a module for the automated selection of transfer machine tool layouts based on workpiece parameters

A.S. Dalechin, D.S. Pekh, A.N. Feofanov 168

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Dynamic control correction of a UAV in the nonlinear stabilization mode of a flight parameter

A.I. Khokhlov, M.M. Stebulyanin 177

Synthesis and kinematic characteristics of 6R mechanisms based on a combination for use in robotics

V.V. Malkova, L.F. Khabibullina, F.F. Khabibullin 187

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_8

УДК 621.914.22

**Юрий Евгеньевич Петухов¹, Петр Валерьевич Домнин¹,
Павел Константинович Добышев²**

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

² АО «Аэроприбор-Восход»
Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Аннотация

Задача повышения эффективности процесса торцевого фрезерования является актуальной в связи с необходимостью снижения вибраций, повышения качества обработанной поверхности и увеличения стойкости режущего инструмента. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение рациональных траекторий движения формообразования режущего инструмента, обеспечивающих изменение условий формирования срезаемого слоя при торцевом фрезеровании по криволинейным (спиралевидным) траекториям движения инструмента. Целью работы является разработка методики определения величины площади срезаемого слоя материала при фрезеровании торцевыми фрезами по криволинейным (спиралевидным) траекториям движения инструмента.

Предложенная методика основана на математическом моделировании траекторий зубьев инструмента, учитывающем вращательное и поступательное движение, а также спиралевидную траекторию фрезы. Методика включает расчет начальных и конечных точек резания, построение областей резания и численное определение площади с использованием теоремы Грина. Проведено моделирование процесса резания для заданных условий обработки, получена зависимость площади срезаемого слоя от номера сегмента.

Представленный подход позволяет точно оценить геометрию срезаемых слоев, что может быть использовано для повышения эффективности процесса резания и снижения износа инструмента. В качестве примера в работе рассматривается процесс торцевого фрезерования по эвольвентной траектории. Результаты исследования показали, что при использовании эвольвентной траектории формообразования величина площади срезаемого слоя возрастет на 0,177 мм² за 43 сегмента, что подтверждает снижение регулярности силового воздействия. Это способствует уменьшению вибраций и повышению эффективности процесса обработки. Разработанная методика может быть использована при выборе и анализе стратегий торцевого фрезерования и выборе конструктивных параметров торцевых фрез.

Ключевые слова: фрезерование, торцевая фреза, эвольвентная траектория, циклоидальная траектория, оптимизация обработки, стратегии обработки

Для цитирования: Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Добышев П.К. Применение сложных траекторий движения формообразования при торцевом фрезеровании // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 8–19. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_8.

Original article

Yuriy E. Petukhov¹, Peter V. Domnin¹, Pavel K. Dobyshev²

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”

Moscow, Russia

² “Aeropribor-Voskhod” OJSC

Moscow, Russia

APPLICATION OF COMPLEX TRAJECTORIES OF SHAPING MOTION IN FACE MILLING

Abstract

Improving the efficiency of the face milling process is an important task due to the need to reduce vibrations, enhance surface quality, and increase tool life. One of the promising approaches to solving this problem is the use of rational toolpath strategies that ensure variation in chip formation conditions during machining along curvilinear (spiral) trajectories. The aim of this study is to develop a method for determining the chip cross-sectional area in face milling with cutters moving along curvilinear trajectories.

The proposed method is based on mathematical modeling of cutter tooth trajectories, taking into account both rotational and translational motions, as well as the spiral trajectory of the tool center. The method includes the determination of entry and exit cutting points, construction of cutting regions, and numerical evaluation of their area using a discrete form of Green’s theorem. Numerical simulation of the cutting process under specified machining conditions was carried out, and the relationship between the chip cross-sectional area and the segment number was obtained.

The proposed approach enables accurate evaluation of chip geometry, which can be used to improve cutting efficiency and reduce tool wear. As an example, face milling along an involute trajectory is considered. The results show that the chip cross-sectional area varies over time when an involute toolpath is used, leading to a reduction in the periodicity of cutting forces. This contributes to vibration reduction and improved machining performance. The developed method can be applied in the analysis and selection of face milling strategies, as well as in the design of cutter parameters.

Keywords: face milling, face mill, involute trajectory, cycloidal trajectory, machining optimization, machining strategies

For citation: Petukhov Yu.E., Domnin P.V., Dobyshev P.K. Application of complex trajectories of shaping motion in face milling. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 8–19. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_8. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_20

УДК 620.1

*Алексей Анатольевич Верещака¹, Екатерина Сергеевна Сотова²,
Павел Юрьевич Потапов³, Илья Михайлович Шмаков⁴,
Татьяна Николаевна Боровик⁴*

¹ Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук
Москва, Россия

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

³ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
Королев, Россия

⁴ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»
Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ОСАЖДЕНИЯ НИТРИДНЫХ PVD ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация

В статье рассматриваются особенности осаждения на образцы из алюминиевого сплава ВТ6 нитридных покрытий ZrN, нанесенных с травлением газовыми ионами плазмы самостоятельного тлеющего разряда с частичным эффектом полого катода (НСМ) при различных напряжениях смещения подложки и с использованием ионной бомбардировки (ИБ). Прочность сцепления с подложкой оценивалась с помощью теста на царапание, а износостойкость – методом «штифт-на-диске». Все образцы с покрытием НСМ продемонстрировали лучшую адгезию с субстратом, чем образец с покрытием ИБ. Испытание методом «штифт-на-диске» на износостойкость и трибологические свойства образцов из алюминиевого сплава ВТ6 с покрытием ZrN, нанесенным с использованием методов подготовки поверхности НСМ или ИБ, а также непокрытого образца показало, что оба образца с покрытием ZrN обеспечили увеличение износостойкости на 36–55% по сравнению с непокрытым образцом, при этом коэффициент трения снизился с ~0,60 для непокрытого образца до ~0,25 для образцов с покрытиями ZrN (в 2,4 раза ниже). Образец с покрытием НСМ обеспечил увеличение износостойкости на 11% по сравнению с образцом с покрытием ИБ. По коэффициенту трения практически нет различий между образцами НСМ и ИБ. Снижение напряжения смещения с –1200 В до –1500 В при использовании метода НСМ значительно дополнительно уменьшило износ образца.

Ключевые слова: контролируемое ускоренное дуговое осаждение из газовой фазы, покрытия, износ, нитрид ванадия, тест «штифт-на-диске»

Для цитирования: Верещака А.А., Сотова Е.С., Потапов П.Ю., Шмаков И.М., Боровик Т.Н. Особенности осаждения нитридных PVD покрытий на детали из алюминиевых сплавов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 20–36. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_20.

Original article

**Alexey A. Vereshchaka¹, Ekaterina S. Sotova², Pavel Yu. Potapov³,
Ilya M. Shmakov⁴, Tatyana N. Borovik⁵**

¹ Institute for Design-Technological Informatics of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

² Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

³ Central Research Institute of Machine Building
Korolev, Russia

⁴ MIREA – Russian Technological University
Moscow, Russia

FEATURES OF NITRIDE PVD COATING DEPOSITION ON ALUMINUM ALLOY PARTS

Abstract

This article examines the deposition of ZrN nitride coatings on VT6 aluminum alloy samples. The coatings were deposited using gas-ion etching in a self-sustained glow discharge with a partial hollow cathode effect (HCM) at various substrate bias voltages and using ion bombardment (IB). Adhesion to the substrate was assessed using a scratch test, and wear resistance was assessed using the pin-on-disk method. All HCM-coated samples demonstrated better adhesion to the substrate than the IB-coated sample. Pin-on-disk testing of the wear resistance and tribological properties of VT6 aluminum alloy specimens with a ZrN coating applied using the HCM or IB surface preparation methods, as well as an uncoated specimen, showed that both ZrN-coated specimens provided a 36–55% increase in wear resistance compared to the uncoated specimen, while the friction coefficient decreased from ~0.60 for the uncoated specimen to ~0.25 for the ZrN-coated specimens (2.4 times lower). The HCM-coated specimen provided an 11% increase in wear resistance compared to the IB-coated specimen. There is virtually no difference in the friction coefficient between the HCM and IB specimens. Reducing the bias voltage from –1200 V to –1500 V using the HCM method significantly further reduced specimen wear.

Keywords: controlled accelerated arc PVD, coatings, wear, vanadium nitride, pin-on-disk test

For citation: Vereshchaka A.A., Sotova E.S., Potapov P.Yu., Shmakov I.M., Borovik T.N. Features of nitride PVD coating deposition on aluminum alloy parts. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 20–36. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_20. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_37

УДК 621.833.6.001.2

Александр Николаевич Соболев, Алексей Яковлевич Некрасов

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ОСНОВ МЕТОДОЛОГИИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация

В работе рассмотрены области применения волновых редукторов на конкретных примерах. Описаны применения волновой передачи во фрезерной головке портального фрезерного станка, во входном механизме портального робота, в космическом аппарате. Приведены состав простейшей волновой передачи, модель-схема волновой передачи. Представлены передачи, используемые в волновых механизмах. Приведены кинематические характеристики волновых передач и их конструктивные особенности. Описаны достоинства и недостатки волновых передач, этапы конструирования и расчета волновых механизмов. Актуальность работы состоит в совершенствовании методики автоматизированного проектирования волновых передач, что потребовало разработки соответствующей функциональной схемы, определяющей порядок, средства и направление информационных потоков при конструировании и технологическом проектировании, а также разработки специального программного обеспечения и методик применения отечественных САПР с целью уменьшения трудозатрат на этапах конструирования и производства в рамках жизненного цикла рассматриваемых в работе изделий машиностроения. Описаны этапы жизненного цикла конструкторско-технологической подготовки производства волновых механизмов. Описаны программные инструменты, применяемые для конструирования и технологической подготовки изготовления деталей волновых передач. Предложено использовать электроэрозионную обработку ЧПУ для изготовления зубчатых колес волновых передач. Использование МКЭ в автоматизированном проектировании волновых механизмов существенно ускорило проведение необходимых сложных расчетов. Результатами апробации разработанной методики автоматизированного проектирования явилась гамма волновых редукторов и коробок скоростей, разработанная на кафедре станков. Показано, что методика автоматизированного проектирования волновых механизмов найдет свое применение в современном учебном процессе университета.

Ключевые слова: волновой редуктор, волновая передача, зубчатая передача, электроэрозионная обработка, автоматизированное проектирование, моделирование

Для цитирования: Соболев А.Н., Некрасов А.Я. Разработка основ методологии конструкторско-технологического проектирования волновых механизмов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 37–52. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_37.

Original article

Alexander N. Sobolev, Alexey Ya. Nekrasov

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF THE FUNDAMENTALS OF THE METHODOLOGY FOR DESIGN AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF HARMONIC MECHANISMS

Abstract

The paper considers the application areas of wave gearboxes using specific examples. Applications of wave transmission in the milling head of a portal milling machine, in the input mechanism of a portal robot, in a spacecraft are described. The composition of the simplest wave transmission, a model diagram of a wave transmission are given. Transmissions used in wave mechanisms are presented. Kinematic characteristics of wave transmissions and their design features are given. The advantages and disadvantages of wave transmissions, stages of design and calculation of wave mechanisms are described. The relevance of the work consists in improving the methodology of automated design of wave transmissions, which required the development of an appropriate functional diagram that determines the order, means and direction of information flows in the design and technological design, as well as the development of special software and methods for using domestic CAD systems in order to reduce labor costs at the stages of design and production within the life cycle of the mechanical engineering products considered in the work. The stages of the life cycle of design and technological preparation for the production of wave mechanisms are described. The software tools used for design and technological preparation for the manufacture of parts of wave transmissions are described. It is proposed to use electrical discharge machining of CNC for the manufacture of gear wheels of wave transmissions. The use of FEM in the automated design of wave mechanisms significantly accelerated the implementation of the necessary complex calculations. The results of testing the developed automated design methodology were a range of wave reducers and speed boxes developed at the machine tool department. It was shown that the automated design methodology for wave mechanisms will find its application in the modern educational process of the university.

Keywords: harmonic reducer, harmonic transmission, gear transmission, electrical discharge machining, automated design, modeling

For citation: Sobolev AN., Nekrasov A.Ya. Development of the fundamentals of the methodology for design and technological development of harmonic mechanisms. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 37–52. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_37. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_53

УДК 544.558+66.088

Владислав Александрович Гапонов¹, Денис Цой², Игорь Вячеславович Суминов¹

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

² ООО «Технологические покрытия»
Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В данной статье представлено комплексное исследование особенностей применения дополнительных электродов для выравнивания формируемых на поверхностях изделий покрытий при плазменно-электролитной обработке (ПЭО). Рассмотрены существующие методы управления процессом для равномерности получаемых покрытий, включая ультразвуковые и электромагнитные воздействия, гидродинамические факторы, а также использование дополнительных катодов различной конструкции. Особое внимание уделено проблеме неравномерности свойств покрытий при одновременной обработке группы деталей со сложной геометрией, включая внутренние и внешние поверхности. Предложено техническое решение в виде конденсаторного источника технологического тока с индивидуальным контролем параметров обработки для каждой поверхности. Приведены результаты анализа эффективности различных конструкций дополнительных электродов и перспективы их применения в промышленном производстве.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, микродуговое окисление, покрытия, катод

Для цитирования: Гапонов В.А., Цой Д., Суминов И.В. Применение дополнительных электродов для процесса плазменно-электролитной обработки// Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 53–60. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_53.

Original article

Vladislav A. Gaponov¹, Denis Tsoy², Igor V. Suminov¹

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

² Technological Coatings
Moscow, Russia

USE OF ADDITIONAL ELECTRODES FOR THE PROCESS OF PLASMA ELECTROLYTE TREATMENT

Abstract

This article presents a comprehensive study of the features of using additional electrodes for leveling coatings formed on the surfaces of products during plasma-electrolyte treatment (PEO). Existing methods for controlling coating uniformity are considered, including ultrasonic and electromagnetic effects, hydrodynamic factors, as well as the use of additional cathodes of various designs. Special attention is paid to the problem of coating property non-uniformity during simultaneous processing of a group of parts with complex geometry, including internal and external surfaces. A technical solution in the form of a capacitor technological current source with individual control of processing parameters for each surface is proposed. The results of analyzing the effectiveness of various designs of additional electrodes and prospects for their application in industrial production are presented.

Keywords: plasma-electrolyte treatment, microarc oxidation, coatings, cathode

For citation: .Gaponov V.A., Tsoy D., Suminov I.V. Use of additional electrodes for the process of plasma electrolyte treatment *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 53–60. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_53. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_61

УДК 621.09

Вадим Ринатович Хабиров, Фан Сагирович Сабиров

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКА НА ТРАЕКТОРИЮ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Аннотация

В работе исследуется влияние динамических характеристик станка на траекторию рабочего органа. Описан анализ траектории рабочего органа при изменении направления движения на 90°. Также проведен анализ частот траектории и собственных частот для определения корреляции между ними.

Ключевые слова: металлообработка, динамические характеристики, траектория рабочего органа, анализ траектории

Для цитирования: Хабиров В.Р., Сабиров Ф.С. Определение влияния динамических характеристик станка на траекторию рабочего органа // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 61–65. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_61.

Original article

Vadim R. Khabirov, Fan S. Sabirov

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DETERMINING THE INFLUENCE OF MACHINE DYNAMIC CHARACTERISTICS ON THE TRAJECTORY OF THE TOOL

Abstract

This paper investigates the influence of the dynamic characteristics of a machine tool on the trajectory of a working body. It describes the analysis of the trajectory of a working body when the direction of movement changes by 90°. An analysis of the trajectory frequencies and natural frequencies was also performed to determine the correlation between them.

Keywords: metalworking, dynamic characteristics, trajectory of the working body, trajectory analysis

For citation: Khabirov V.R., Sabirov F.S. Determining the influence of machine dynamic characteristics on the trajectory of the tool. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 61–65. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_61. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_66

УДК 621.92

Валентин Александрович Яшков, Любовь Геннадьевна Никитина

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Муром, Россия

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СБОРНОГО ИНСТРУМЕНТА С РАДИАЛЬНО-ПОДВИЖНЫМИ БЛОКАМИ НА ТОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ЭЛЛИпсоИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация

В статье исследуется влияние кинематических и силовых параметров на точность внутреннего шлифования нецилиндрических поверхностей на примере эллипсоидных отверстий корпусов пластинчатых насосов. Актуальность работы обусловлена повышенными требованиями современного машиностроения к качеству обработки сложной геометрии и необходимостью исключения термических дефектов. Предложено применение сборного абразивного инструмента с радиально-подвижными блоками, обеспечивающего адаптивность формообразования.

Целью исследования явился анализ математической модели процесса для определения производительности и равномерности съема материала. Методика базируется на контактной теории Герца и численном моделировании глубины внедрения абразивных зерен. В ходе экспериментов варьировались частота вращения шпинделя, радиус и длина абразивных элементов.

Результаты подтвердили адекватность модели. Установлена кубическая зависимость производительности от частоты вращения и обратная зависимость глубины внедрения зерна от радиуса элемента. Выявлено, что неравномерность съема прямо пропорциональна эксцентриситету отверстия вследствие изменения центробежной силы. На основе полученных зависимостей выделены режимы чистовой (глубина 1–5 мкм) и черновой обработки. Теоретически обоснована возможность достижения качества точности IT7. Разработанная модель позволяет целенаправленно формировать режимы обработки для обеспечения требуемого сочетания производительности и точности сложнопрофильных поверхностей, компенсируя переменную кривизну профиля за счет автоматического регулирования силы прижима сегментов.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, нецилиндрические поверхности, сборный абразивный инструмент, радиально-подвижные блоки, математическая модель, кинематические параметры, точность обработки, производительность, эллипсоидные отверстия, неравномерность съема материала

Для цитирования: Яшков В.А., Никитина Л.Г. Влияние параметров сборного инструмента с радиально-подвижными блоками на точность внутреннего шлифования эллипсоидных поверхностей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 66–75. – DOI: 10.47617/2072-3172_2026_2_66.

Original article

Valentin A. Yashkov, Lyubov G. Nikitina

Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov
Murom, Russia

THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF AN ASSEMBLY TOOL WITH RADIALY MOVABLE BLOCKS ON THE ACCURACY OF INTERNAL GRINDING OF ELLIPSOIDAL SURFACES

Abstract

This study examines the influence of kinematic and force parameters on the accuracy of internal grinding of non-cylindrical surfaces, exemplified by ellipsoidal holes in vane pump housings. The relevance of this work is driven by heightened modern engineering requirements for machining quality of complex geometries and the necessity of eliminating thermal defects. The application of a modular abrasive tool with radially movable blocks is proposed, ensuring shaping adaptability and effective heat dissipation via a hollow spindle.

The research aim was to analyze the process mathematical model to determine productivity and material removal uniformity. The methodology relies on Hertzian contact theory and numerical modeling of abrasive grain penetration depth. During the experiments, spindle rotation frequency, radius, and length of abrasive elements were varied.

The results confirmed the model's adequacy. A cubic dependence of productivity on rotation frequency and an inverse dependence of grain penetration depth on element radius were established. It was revealed that removal non-uniformity is directly proportional to hole eccentricity due to variations in centrifugal force. Based on the obtained dependencies, finishing (depth 1–5 μm) and roughing machining modes were identified. The possibility of achieving IT7 accuracy quality was theoretically substantiated. The developed model allows targeted formation of machining modes to ensure the required combination of productivity and accuracy for complex profile surfaces, compensating for variable profile curvature through automatic regulation of segment pressing force.

Keywords: internal grinding, non-cylindrical surfaces, modular abrasive tool, radially movable blocks, mathematical model, kinematic parameters, machining accuracy, productivity, ellipsoidal holes, material removal non-uniformity

For citation: Yashkov V.A., Nikitina L.G. The influence of the parameters of an assembly tool with radially movable blocks on the accuracy of internal grinding of ellipsoidal surfaces. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2026. No 2 (77). P. 66–75. DOI: 10.47617/2072-3172_2026_2_66. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_89

УДК 621.002(075.8)

Владимир Павлович Вороненко, Светлана Викторовна Луцюк

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

МЕТОД РАСЧЁТА РАЗМЕРА КОМПЕНСАТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРИГОНОЧНЫХ РАБОТ БЕЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПОПРАВКИ

Аннотация

Изложен метод расчёта предельных значений звена-компенсатора при решении задач достижения точности замыкающего звена методом пригонки. В традиционной методике расчёт величины компенсатора предлагается проводить через определение поправки в координату середины поля допуска звена-компенсатора. Для этого необходимо провести перерасчёт значений составляющих звеньев и от предельных отклонений перейти к их координатам середин полей допусков. После определения величины поправки и внесения её в координату середины поля допуска заранее выбранного компенсатора получить предельные отклонения компенсатора. По полученным данным изготавливаются заготовки компенсатора под последующее выполнение пригоночных работ. Предлагаемый метод позволяет получить предельные отклонения компенсатора – его минимальное и максимальное значения размеров – без дополнительных вычислений. Это сокращает производимые расчёты, уменьшает время технологической подготовки производства и позволяет (при необходимости) автоматизировать процесс расчётов.

Ключевые слова: метод пригонки, расчёт звена-компенсатора, метод максимума-минимума

Для цитирования: Вороненко В.П., Луцюк С.В. Метод расчёта размера компенсатора при выполнении пригоночных работ без определения величины поправки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 89–99. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_89.

Original article

Vladimir P. Voronenko, Svetlana V. Lutsyuk

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

METHOD OF CALCULATING THE COMPENSATOR SIZE DURING FITTING OPERATIONS WITHOUT DETERMINING THE CORRECTION VALUE

Abstract

The method of calculation of the limit values of the compensator link when solving problems of achievement of the accuracy of the closing link by the fitting method is stated. In the classical method, the calculation of the compensator's value is proposed to be carried out by determining the correction to the coordinate of the middle of the tolerance field of the compensator link. To do this, it is necessary to recalculate the values of the constituent links and move from the limit deviations to their coordinates of the middle of the tolerance fields. After determining the correction value and applying it to the coordinate of the middle of the tolerance field of the pre-selected compensator, the limit deviations of the compensator can be obtained. Based on the obtained data, the compensator can be prepared for subsequent fitting operations. The new method allows for obtaining the limit deviations of the compensator – its minimum and maximum values – without prior calculations. This reduces the number of calculations performed, reduces the time required for technological production preparation, and allows (if necessary) for the automation of the calculation process.

Keywords: fitting method, compensator link calculation, maximum-minimum method

For citation: Voronenko VP., Lutsyuk S.V. Method of calculating the compensator size during fitting operations without determining the correction value. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 89–99. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_89. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_100

УДК 658.57:519

Александр Михайлович Дмитриев¹, Наталья Васильевна Коробова²

¹ Российская академия наук
Москва, Россия

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ДИСПЕРСИИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Аннотация

Рассмотрено математическое моделирование технологических процессов с помощью алгебраических уравнений, коэффициенты в которых определяются с помощью физических или вычислительных экспериментов. Показано, что отличие между физическими и вычислительными экспериментами заключается в возможности проведения при физическом экспериментировании статистического анализа результатов. На конкретном примере продемонстрировано преимущество статистического анализа результатов эксперимента. Разъяснена роль дисперсии воспроизводимости экспериментов при проводимом статистическом анализе. Приведены примеры дисперсий воспроизводимости экспериментов при исследовании разных технологических процессов холодной объемной штамповки.

Ключевые слова: процессы обработки давлением, математическое моделирование, статистический анализ моделей, примеры дисперсий воспроизводимости экспериментов

Для цитирования: Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Дисперсии воспроизводимости экспериментов при исследовании операций холодной объемной штамповки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 100–113. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_100.

Original article

Alexander M. Dmitriev¹, Natalia V. Korobova²

¹ Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

² Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

THE VARIANCES OF REPRODUCIBILITY OF EXPERIMENTS IN THE STUDY OF COLD VOLUMETRIC STAMPING OPERATIONS

Abstract

Mathematical modeling of technological processes using algebraic equations, the coefficients of which are determined using physical or computational experiments, is considered. It is shown that the difference between physical and computational experiments lies in the possibility of statistical analysis of the results during physical experimentation. A concrete example demonstrates the advantage of statistical analysis of experimental results. The role of the difference in the possibility of evaluating the reproducibility of experiments by the statistical analysis is explained. Examples of reproducibility variances of experiments in the study of various technological processes of cold volumetric stamping are given.

Keywords: pressure treatment processes, mathematical modeling, statistical analysis of models, examples of reproducibility variances of experiments

For citation: Dmitriev A.M., Korobova N.V. The variances of reproducibility of experiments in the study of cold volumetric stamping operations. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 100–113. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_100. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_114

УДК 621.77.014

***Егор Николаевич Полосин, Евгений Николаевич Сосенушкин,
Семен Васильевич Любимский***

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА В МАТРИЦЕ С УГЛОМ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ КАНАЛОВ 60°

Аннотация

В статье обсуждается перспективность развития способа равноканального углового прессования для получения материалов с ультрамелкозернистой структурой и повышенными механическими свойствами. Объектом исследования является способ четырёхпроходного равноканального углового прессования (РКУП) по маршрутам *A* и *C* в матрице с углом пересечения каналов $\Phi=60^\circ$. Образец стержнеобразной формы квадратного сечения выполнен из алюминиевого деформируемого сплава Al 3003 (аналог АМц ГОСТ 4784-2019). Проведён анализ различных параметров, полученных компьютерным моделированием, по результатам которого выявлено, что исследуемая схема показала высокую эффективность в части интенсивности деформирования по сравнению с традиционными схемами равноканального углового прессования.

Ключевые слова: интенсивное пластическое деформирование, равноканальное угловое прессование, компьютерное моделирование

Для цитирования: Полосин Е.Н., Сосенушкин Е.Н., Любимский С.В. Исследование равноканального углового прессования алюминиевого деформируемого сплава в матрице с углом пересечения каналов 60° // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 114–131. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_114.

Original article

Egor N. Polosin, Evgeny N. Sosenushkin, Semyon V. Lyubimsky

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

STUDY OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOY IN A MATRIX WITH A CHANNEL INTERSECTION ANGLE OF 60°

Abstract

This article discusses the potential of developing equal-channel angular pressing (ECAP) to produce materials with an ultrafine-grained structure and enhanced mechanical properties. The study focuses on a four-pass equal-channel angular pressing (ECAP) process using routes *A* and *C* in a die with a channel intersection angle of $\Phi=60^\circ$. A rod-shaped, square-section specimen is made of Al 3003 deformable aluminum alloy (analogous to AMts GOST 4784-2019). An analysis of various parameters obtained through computer modeling revealed that the studied process demonstrated high efficiency in terms of deformation intensity compared to traditional ECAP processes.

Keywords: severe plastic deformation, equal channel angular pressing, computer modeling

For citation: Polosin E.N., Sosenushkin E.N., Lyubimsky S.V. Study of equal-channel angular pressing of deformable aluminum alloy in a matrix with a channel intersection angle of 60°. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 114–131. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_114. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_132

УДК 621.9.06

Сергей Иванович Досько¹, Андрей Геннадьевич Ширишов²

¹ Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук
Москва, Россия

² Научно-производственный центр «Кропус»
Москва, Россия

3D ПАРАДИГМА МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Аннотация

Представлена 3D парадигма моделирования в вибрационной диагностике шпиндельных узлов, которая использует гибридный подход, основанный на экспериментальном модальном анализе и пространственных конечно-элементных (КЭ) моделях шпиндельных узлов. В целях верификации подхода были использованы экспериментальные данные шпиндельных узлов партии токарных станков с ЧПУ. В рамках экспериментального модального анализа проведена оценка собственных частот и коэффициентов модального демпфирования для расщеплённых пиков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) шпиндельного узла в пределах рабочего диапазона частот вращения. Показаны основные этапы моделирования, включающие в себя построение конечно-элементной модели и решение задачи о собственных значениях. Выполнено моделирование шпиндельного узла без учёта и с учётом асимметрии жёсткости опор. Подобраны величины асимметрии жёсткости опор шпиндельного узла. Путём сопоставления результатов моделирования, проведенного без учёта и с учётом асимметрии жёсткости опор, показано, что расщепление пиков на амплитудно-частотной характеристике реальных шпиндельных узлов является следствием асимметрии жёсткости их опор. Выполнен анализ влияния поворота опор вала с асимметрией жёсткости на вид АЧХ шпиндельного узла. Показано, что вид выходной частотной характеристики шпиндельного узла дополнительно зависит от угла поворота плоскости измерений. Выполнена оценка величины угла поворота опор шпиндельного узла, для которого были получены экспериментальные данные. Сделан вывод о необходимости проведения эксперимента по вибрационной диагностике шпиндельного узла по всей окружности вместо одной плоскости. Показано, что использование 3D парадигмы качественно меняет ход решения задачи идентификации динамических процессов в шпиндельных узлах и кардинально повышает качество вибрационной диагностики.

Ключевые слова: парадигма, шпиндельный узел, гибридное моделирование, модальный анализ, пространственные модели

Для цитирования: Досько С.И., Ширишов А.Г. 3D парадигма моделирования в вибрационной диагностике шпиндельных узлов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 132–143. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_132.

Original article

Sergey I. Dosko¹, Andrey G. Shirshov²

¹ Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

² Scientific and Production Center “Kropus”
Moscow, Russia

3D PARADIGM FOR MODELING AND VIBRATION DIAGNOSTICS OF SPINDLE UNITS

Abstract

A 3D modelling paradigm for vibration diagnostics of spindle units is presented. It uses a hybrid approach based on experimental modal analysis and spatial finite element (FE) models of spindle units. Experimental data from spindle units of a batch of CNC lathes were used to verify the approach. As a part of the experimental modal analysis, the natural frequencies and modal damping coefficients were evaluated for the split peaks of the amplitude–frequency characteristic (AFC) of the spindle unit within the operating range of rotational frequencies. The main stages of modelling are shown, including the construction of a finite element model and the solution of the eigenvalue problem. Modelling of the spindle unit was performed without and with consideration of the support stiffness asymmetry. The values of the asymmetry of the spindle unit support stiffness were adjusted. By comparing the results of modelling performed without and with consideration of the support stiffness asymmetry, it was shown that the splitting of peaks in the amplitude–frequency response of real spindle assemblies is a consequence of the asymmetry of their support stiffness. An analysis of the effect of shaft support rotation with stiffness asymmetry on the appearance of the spindle unit’s frequency response characteristic was performed. It was shown that the appearance of the spindle unit’s output frequency response characteristic additionally depends on the angle of rotation of the measurement plane. An assessment was made of the angle of rotation of the spindle unit supports, for which experimental data were obtained. A conclusion was made about the need to conduct an experiment on vibration diagnostics of the spindle unit around the entire circumference instead of a single plane. It has been shown that the use of a 3D paradigm qualitatively changes the process of solving the problem of identifying dynamic processes in spindle assemblies and radically improves the quality of vibration diagnostics.

Keywords: paradigm, spindle unit, hybrid modelling, modal analysis, spatial models

For citation: Dosko S.I., Shirshov A.G. 3D paradigm for modeling and vibration diagnostics of spindle units. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 132–143. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_132. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_144

УДК 65.011.56

Илья Михайлович Пахомов, Александра Владимировна Козлова

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПО STEP-МОДЕЛЯМ ПРИ 2.5D-ФРЕЗЕРОВАНИИ

Аннотация

В работе представлено описание алгоритма для автоматизированной оценки технологичности деталей по 3D-моделям в формате STEP в условиях одностороннего 2,5D-фрезерования. Разработка ориентирована на технологическую подготовку производства, когда необходимо в короткие сроки проверить достижимость отверстий, карманов, пазов и наружного контура реальным парком оборудования и имеющейся оснасткой без привлечения полнофункциональных CAD/CAM-пакетов. Приложение функционирует автономно: выполняет импорт STEP, интерактивную 3D-визуализацию и выбор базовой (верхней) плоскости, после чего приводит модель к рабочей системе координат, в которой ось Z соответствует направлению подачи. Алгоритмы анализа реализованы на основе BREP-представления и используют классификацию граней по типу (плоская, цилиндрическая и др.) и граф смежности для выделения технологических признаков. В текущей постановке распознаются отверстия (глухие и сквозные), карманы, пазы и профиль обрезки по контуру, а также вычисляются габариты детали и ключевые параметры элементов (диаметры, глубины, минимальные ширины, радиусы скруглений). Далее параметры сопоставляются с базой станков и инструмента: учитываются размеры рабочей зоны, допустимое погружение шпинделя, набор цанг, геометрия инструмента (диаметр, длина режущей части, общая длина) и назначение по материалам (дерево, пластики, цветные металлы). Проверка выполнимости дополняется контролем доступности, включая риск упора шпиндельного узла в заготовку при глубоких полостях и ограничениях по жёсткости инструмента. По результатам формируется объяснимое заключение «выполнимо/невыполнимо» и проектный план обработки с альтернативными стратегиями, например, спиральной интерполяцией вместо отсутствующего сверла. Апробация на тестовых моделях показала сокращение времени первичного анализа и снижение числа ошибок подбора оборудования за счёт формализации проверок и фиксации причин решений.

Ключевые слова: технологичность конструкции, STEP, BREP, 2.5D-фрезерование, распознавание признаков, база станков и инструментов

Для цитирования: Пахомов И.М., Козлова А.В. Разработка ПО для оценки технологичности изделий по STEP-моделям при 2.5D-фрезеровании // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 144–154. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_144.

Original article

Ilya M. Pakhomov, Aleksandra V. Kozlova

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR ASSESSING PART MANUFACTURABILITY BASED ON STEP-MODELS IN 2.5D-MILLING

Abstract

This paper presents a desktop software prototype for automated manufacturability assessment of parts based on 3D STEP models under single-sided 2.5D milling conditions. The development is intended for process planning, where it is necessary to quickly verify the feasibility of holes, pockets, slots, and the external contour using the available machine fleet and tooling, without relying on full-scale CAD/CAM packages. The application operates autonomously: it imports STEP data, provides interactive 3D visualization, and allows the user to select a reference (top) plane; the model is then aligned to a machining coordinate system in which the Z-axis corresponds to the tool feed direction. The analysis algorithms are implemented on the basis of boundary representation (B-rep) and use face-type classification (planar, cylindrical, etc.) together with a face adjacency graph to extract machining features. In the current scope, the system recognizes holes (blind and through), pockets, slots, and a contour-cutting profile, and computes the part envelope as well as key feature parameters (diameters, depths, minimum widths, and corner radii). These parameters are subsequently matched against a database of machine tools and cutters, taking into account the working envelope, allowable spindle plunge, collet set, tool geometry (diameter, cutting length, overall length), and material suitability (wood, plastics, non-ferrous metals). Feasibility checks are complemented by accessibility evaluation, including the risk of spindle-body collision with the stock in deep cavities and constraints caused by limited tool stiffness. The output includes an explainable “feasible/not feasible” decision and a process plan with alternative strategies, such as helical interpolation when a required drill is unavailable. Validation on test models demonstrated reduced initial analysis time and fewer machine/tool selection errors due to formalized checks and explicit recording of decision rationales.

Keywords: design for manufacturability, STEP, BREP, 2.5D milling, feature recognition, machine tool and tooling database

For citation: Pakhomov I.M., Kozlova A.V. Development of software for assessing part manufacturability based on STEP-models in 2.5D-milling. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 144–154. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_144. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_155

УДК 621.9.06-52:004.94

Ярослав Игоревич Пимушкин, Дарья Юрьевна Прокопович

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПЯТИКООРДИНАТНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА: КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА, МОДУЛЬНЫЙ СОСТАВ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ

Аннотация

В статье рассматривается концепция построения цифрового двойника пятикоординатного обрабатывающего центра для моделирования, прогнозирования и компенсации погрешностей позиционирования инструментальной точки (ТСР). Предложена многоуровневая архитектура цифрового двойника, разработанная с опорой на положения стандарта ISO 23247 и включающая физический домен, уровень сбора данных, вычислительное ядро и пользовательский домен. Описан состав вычислительного ядра, объединяющего взаимосвязанные функциональные модули: геометрический, кинематический, тепловой, динамический, аналитический и ML-предиктор. Представлен формализм матриц однородных преобразований для кинематической модели с поддержкой РТСР, математическую модель теплового смещения инструментальной точки и схему ассимиляции данных на основе расширенного фильтра Калмана, а также подход к интеграции данных физических датчиков через протокол MTConnect. Систематизированы четыре группы погрешностей – геометрические, тепловые, динамические и силовые – и соответствующие методы их компенсации. Рассмотрена схема замкнутого контура обратной связи между цифровым двойником и системой ЧПУ с многоуровневой верификацией корректирующих воздействий. Архитектура масштабируема и применима к широкому классу пятикоординатного оборудования.

Ключевые слова: цифровой двойник, пятикоординатная обработка, ISO 23247, матрицы однородных преобразований, РТСР, тепловой дрейф, MTConnect, машинное обучение, компенсация погрешностей

Для цитирования: Пимушкин Я.И., Прокопович Д. Ю. Цифровой двойник пятикоординатного обрабатывающего центра: концептуальная архитектура, модульный состав и принципы построения // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 155–167. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_155.

Original article

Yaroslav I. Pimushkin, Darya Yu. Prokopovich

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DIGITAL TWIN OF A FIVE-AXIS MACHINING CENTER: CONCEPTUAL ARCHITECTURE, MODULAR STRUCTURE, AND DESIGN PRINCIPLES

Abstract

The article discusses the concept of developing a digital twin of a five-axis machining center for modeling, predicting, and compensating for Tool Center Point (TCP) positioning errors. A multi-level digital twin architecture is proposed, developed based on the ISO 23247 standard, which includes a physical domain, a data acquisition layer, a computational core, and a user domain. The composition of the computational core is described, combining interconnected functional modules: geometric, kinematic, thermal, dynamic, analytical, and an ML predictor. The article presents the homogeneous transformation matrix formalism for a kinematic model with RTCP support, a mathematical description of tool center points thermal displacement based on the Extended Kalman Filter, and an approach to integrating physical sensor data via the MTConnect protocol. Four groups of errors—geometric, thermal, dynamic, and force-related—and their corresponding compensation methods are systematized. A closed-loop feedback scheme between the digital twin and the CNC system with multi-level verification of corrective actions is examined. The architecture is scalable and applicable to a wide range of five-axis equipment.

Keywords: digital twin, five-axis machining, ISO 23247, homogeneous transformation matrices, RTCP, thermal drift, MTConnect, machine learning, error compensation

For citation: Pimushkin Ya.I., Prokopovich D.Yu. Digital twin of a five-axis machining center: conceptual architecture, modular structure, and design principles. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 155–167. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_155. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_168

УДК 621.9.06-112.6

*Александр Сергеевич Далечин, Данила Сергеевич Пех,
Александр Николаевич Феофанов*

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА КОМПОНОВОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы автоматизации процесса выбора компоновок агрегатных станков на стадиях технического предложения и эскизного проекта. Обозначен вопрос о необходимости сохранения и передачи наработанного опыта в области конструирования агрегатных станков и автоматических линий. Рассмотрены работы исследователей, отмечающих потребность машиностроительных предприятий в металлообрабатывающих станках для крупносерийного производства. Предложены подход к выбору компоновок агрегатных станков, основанный на понятии обобщенной обрабатываемой детали, и таблица выведенных ограничений по выбору унифицированных узлов для снижения трудоемкости проектирования агрегатных станков. Разработан алгоритм для работы модуля автоматизированной системы выбора компоновок агрегатных станков по характеристикам обрабатываемого изделия и параметрам технологического процесса для повышения эффективности конструкторских работ над компоновками агрегатных станков. Приведено описание исходных данных, необходимых для работы алгоритма. Спроектирован программный модуль автоматизированной системы выбора компоновок агрегатных станков на базе разработанного алгоритма. Рассмотрены основные стадии разработки модуля и введено понятие конфигуратора для выбора компоновок агрегатных станков. Описаны этапы выбора компоновки агрегатного станка и последовательность взаимодействия пользователя с интерфейсом спроектированного программного модуля. Перечислены пути использования разработанного программного модуля для уменьшения трудоемкости и сокращения сроков проектирования агрегатных станков и выстраивания взаимодействия с заказчиком металлообрабатывающего технологического оборудования.

Ключевые слова: агрегатный станок, параметры обрабатываемого изделия, автоматизированная система, алгоритм, программный модуль

Для цитирования: Далечин А.С., Пех Д.С., Феофанов А.Н. Принципы построения модуля автоматизированного выбора компоновок агрегатных станков по параметрам обрабатываемой заготовки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 168–176. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_168.

Original article

Alexander S. Dalechin, Danila S. Pekh, Alexander N. Feofanov

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

PRINCIPLES OF DESIGNING A MODULE FOR THE AUTOMATED SELECTION OF TRANSFER MACHINE TOOL LAYOUTS BASED ON WORKPIECE PARAMETERS

Abstract

The article addresses the issues of automating the process of selecting modular machine tool layouts at the stages of technical proposal and conceptual design. The necessity of preserving and transferring accumulated experience in the field of designing modular machine tools and automatic lines is highlighted. Research works are reviewed that note the need of machine-building enterprises for metal-cutting machine tools for high-volume production. An approach to selecting modular machine tool layouts based on the concept of a generalized workpiece is proposed, along with a table of derived constraints for the selection of standardized modular machine tool units to reduce design labor intensity. An algorithm has been developed (to clarify the purpose of the article) for the operation of an automated system module for selecting modular machine tool layouts based on workpiece characteristics and technological process parameters, aimed at improving the efficiency of design work on modular machine tool layouts. A description of the input data required for the algorithm’s operation is provided. A software module for the automated system of selecting modular machine tool layouts has been designed based on the developed algorithm. The main stages of the module’s development are examined, and the concept of a configurator for selecting modular machine tool layouts is introduced. The stages of selecting a modular machine tool layout and the sequence of user interaction with the interface of the designed software module are described. The ways of using the developed software module to reduce labor intensity and shorten the design time of modular machine tools, as well as to establish interaction with the customer of metal-cutting technological equipment, are outlined.

Keywords: transfer machine tool, workpiece parameters, automated system, algorithm, software module

For citation: Dalechin A.S., Pekh D.S., Feofanov A.N. Principles of designing a module for the automated selection of transfer machine tool layouts based on workpiece parameters. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 168–176. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_168. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_177

УДК 629.78.05:519.71

Александр Игоревич Хохлов, Михаил Михайлович Стебулянин

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В РЕЖИМЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛЕТНОГО ПАРАМЕТРА

Аннотация

В работе предложена структура закона управления угловой скоростью квадрокоптера с явным выделением упреждающей и корректирующей составляющих, в которой полный управляющий момент представляется в виде суммы двух функционально различных компонент. Синтез выполнен в строгой последовательности: сначала из условия желаемой динамики ошибки получается единственный полный закон управления, затем из него алгебраически выделяется упреждающее звено как частный случай при нулевой ошибке отслеживания. Ключевое преимущество такого подхода – упреждающая составляющая вычисляется без измерений текущего состояния, поэтому она принципиально не может быть затронута шумом гироскопа. Корректирующая составляющая содержит пропорционально-интегральный член и остаточную гироскопическую нелинейность, которая компенсирует перекрёстные связи между осями управления.

В предположении точно известной матрицы инерции совместное действие обеих составляющих обеспечивает линеаризацию в номинальном случае замкнутой системы; динамика ошибки описывается линейным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с назначаемыми собственными значениями. Выполнено численное моделирование для платформы БПЛА класса 450 мм с моделью шума гироскопа MPU-6000 (среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1$, мрад/с). Истинная установившаяся ошибка отслеживания составила 0,2 мрад/с – приблизительно в двенадцать раз ниже шумового предела $\sigma \cdot \sqrt{(8/\pi)} \approx 2,39$ мрад/с, определяемого собственным шумом гироскопа в трёх каналах. Остаточный гироскопический член в установившемся режиме не превышает 1% от нормы корректирующей составляющей. Сравнение трёх режимов демпфирования показало, что критическое демпфирование ($\zeta = 1$) обеспечивает наибо́льшее апериодическое затухание без перерегулирования.

Ключевые слова: квадрокоптер, управление угловой скоростью, упреждающее звено, линеаризация обратной связи, компенсация гироскопического момента, шум гироскопа, уравнения Эйлера

Для цитирования: Хохлов А.И., Стебулянин М.М. Динамическая коррекция управления БПЛА в режиме нелинейной стабилизации полетного параметра // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 177–186. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_177.

Original article

Alexander I. Khokhlov, Mikhail M. Stebulyanin

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DYNAMIC CONTROL CORRECTION OF A UAV IN THE NONLINEAR STABILIZATION MODE OF A FLIGHT PARAMETER

Abstract

This paper proposes a control law structure for the angular rate of a quadrotor with an explicit decomposition of the commanded torque into a feedforward component and a feedback component (two-degree-of-freedom architecture). The synthesis follows a strict sequential logic: the unique complete control law is first derived from the desired error dynamics condition, and the feedforward component is then algebraically extracted as its special case at zero tracking error. The key advantage of this approach is that the feedforward component is computed without measurements of the current state and is therefore fundamentally unaffected by gyroscope noise. The feedback component comprises a proportional-integral corrective term and a residual gyroscopic nonlinearity that compensates cross-coupling between control axes.

Under the assumption of an exactly known inertia matrix, the combined action of both components achieves exact feedback linearization of the closed-loop system; the tracking error dynamics are governed by a second-order linear ordinary differential equation with assignable eigenvalues. Numerical simulation is performed for a 450 mm class platform with an MPU-6000 gyroscope noise model (standard deviation $\sigma = 1.5$ mrad/s). The true steady-state tracking error reaches 0.2 mrad/s, approximately twelve times below the noise threshold $\sigma \cdot \sqrt{8/\pi} \approx 2.39$ mrad/s set by the gyroscope noise across three channels. The residual gyroscopic term in steady state does not exceed 1% of the feedback norm. A comparison of three damping regimes confirms that critical damping ($\zeta = 1$) yields the fastest aperiodic convergence without overshoot.

Keywords: quadrotor, angular rate control, feedforward action, feedback linearization, gyroscopic torque compensation, gyroscope noise, Euler equations

For citation: Khokhlov A.I., Stebulyanin M.M. Dynamic control correction of a UAV in the nonlinear stabilization mode of a flight parameter. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2026. No 2 (77). P. 177–186. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_177. (In Russian)

Оригинальная статья

DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_187

УДК 621.865.8

**Виктория Валерьевна Малкова, Лейсан Фаритовна Хабибуллина,
Фаниль Фаргатович Хабибуллин**

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ
Казань, Россия

СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 6R МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Аннотация

В статье представлен комплексный анализ шестизвенных механизмов, синтезированных на основе комбинации плоских и сферических четырехзвенных механизмов с механизмами Беннетта. Основное внимание уделено исследованию кинематических свойств, методов синтеза и функциональных возможностей полученных структур для применения в современных робототехнических системах. Подробно рассмотрен синтез механизмов с однократной подвижностью, обеспечивающей предсказуемость и управляемость движения. Рассмотрены кинематические аспекты, влияющие на потенциальную жесткость и устойчивость, что критически важно для высокоточных применений. В работе систематизированы условия параллельности, пересечения и перекрещивания осей вращательных пар (шарниров), а также исследовано влияние геометрических параметров звеньев (длин и углов) на характер и возможности генерируемого движения. Выведены зависимости для расчёта размеров, позволяющих достигать желаемых свойств.

Результаты исследования показывают, что предложенные классы шестизвенных механизмов обладают высокой степенью адаптивности и могут быть эффективно применены для решения специфических задач, включая точное позиционирование и обход. Это открывает значительные перспективы для их внедрения в промышленных манипуляторах, хирургических роботах, а также в перспективных направлениях бионической и адаптивной робототехники.

Ключевые слова: шестизвенные механизмы, кинематика, робототехника, механизм Беннетта, четырехзвенники

Для цитирования: Малкова В.В., Хабибуллина Л.Ф., Хабибуллин Ф.Ф. Синтез и кинематические характеристики 6R механизмов на основе комбинации для применения в робототехнике // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 2 (77). – С. 187–199. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_187.

Original article

Viktoriya V. Malkova, Leisan F. Khabibullina, Fanil F. Khabibullin

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Kazan, Russia

SYNTHESIS AND KINEMATIC CHARACTERISTICS OF 6R MECHANISMS BASED ON A COMBINATION FOR USE IN ROBOTICS

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of six-link mechanisms synthesized on the basis of a combination of flat and spherical four-link mechanisms with Bennett mechanisms. The main focus is on the study of kinematic properties, synthesis methods and functional capabilities of the obtained structures for application in modern robotic systems. The synthesis of mechanisms with single degree of freedom, which ensures predictability and controllability of trajectories, is considered in detail. An analysis of dynamic characteristics, such as structural rigidity and resistance to operational loads, which is critical for high-precision applications, has been carried out. The conditions of parallelism, intersection and crossing of the axes of rotational pairs (hinges) are systematized, and the influence of geometric parameters of links (lengths and angles) on the nature and capabilities of the generated motion is investigated. Mathematical dependencies for determining the optimal dimensions of combined links and angles between axes that provide the given kinematic properties are derived and presented.

The results of the study show that the proposed classes of six-link mechanisms have a high degree of adaptability and can be effectively optimized to solve specific problems, including precise positioning, obstacle avoidance and reproduction of complex spatial trajectories. This opens up significant prospects for their implementation in industrial manipulators, surgical robots, as well as in promising areas of bionic and adaptive robotics.

Keywords: six-link mechanisms, kinematics, robotics, Bennett mechanism, four-link mechanisms

For citation: Malkova V.V., Khabibullina L.F., Khabibullin F.F. Synthesis and kinematic characteristics of 6R mechanisms based on a combination for use in robotics. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2026. No 2 (77). P. 187–199. DOI 10.47617/2072-3172_2026_2_187. (In Russian)