
ISSN 2072-3172
DOI 10.4761/2072-3172

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»

ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (58), июль-сентябрь 2021

*Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук»*

ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 3 (58), 2021

Научный рецензируемый журнал
Журнал основан в 2008 году

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-31574 от 4 апреля 2008 г.

Председатель Редакционного Совета,
и.о. Ректора ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
В.В. Серебрянный

Главный редактор
Ю.В. Подураев, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Научный редактор
Ю.В. Илюхин, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Редакционный совет

- | | |
|---------------------------------------|--|
| Бьянки Джакомо | д-р техн. наук, глава департамента Института промышленных технологий и автоматизации ITIA-CNP (Италия) |
| Вегенер Конрад | д-р техн. наук, проф., Руководитель института машиностроения и технологии, ETN Цюрих (Швейцария) |
| Гречишников Владимир Андреевич | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Дмитриев Александр Михайлович | чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Еленева Юлия Яковлевна | д-р экон. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Заборовский Тадеуш | д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления и информационных систем Познаньский технологического университета (г. Познань, Польша) |
| Илюхин Юрий Владимирович | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Каталинич Бранко | д-р техн. наук, проф., Венский университет технологий (Австрия) |
| Клейнер Георгий Борисович | чл.-кор. РАН, д-р экон. наук, зам. директора ЦЭМИ РАН (Россия) |
| Корриат Ханс Иоахим | д-р техн. наук, глава департамента Института производственного управления и автоматизации им. Фраунхофера (Германия) |
| Кутин Андрей Анатольевич | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Мartiнов Георги Мартинов | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Подураев Юрий Викторович | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Позднеев Борис Михайлович | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Стебулянин Михаил Михайлович | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Такаш Янош | д-р техн. наук, проф., Будапештский университет технологии и экономики (Венгрия) |
| Телешевский Владимир Ильич | д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |
| Торресильяс Ramon | д-р техн. наук, проф., директор Центра исследований наноматериалов и нанотехнологий (Испания) |
| Уварова Людмила Александровна | д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ |

© ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021

VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 3 (58), 2021

Scientific peer-reviewed journal
The magazine was founded in 2008

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology
«STANKIN» (MSUT «STANKIN»)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Compliance with Legislation in the Field of Mass
Communications and Protection of Cultural Heritage, certificate PI No. FS77231574 of April 4, 2008.

Chairman of editorial board
Acting Rector of MSUT «STANKIN»
V.V. Serebrenniy

Editor-in-Chief
Yu.V. Poduraev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Scientific editor
Yu.V. Ilyukhin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Editorial Board of «Vestnik MSUT «Stankin» Journal

- Giacomo Bianchi** Doctor of Science, Head of department «Dynamic Analysis Simulation of Machinery» of ITIA-CNR (Italy)
- Konrad Wegener** Doctor of Science, Professor, Head of Inst, Machine Tools Manufacturing, Full Professor at the Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich (Switzerland)
- Vladimir A. Grechishnikov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Aleksander M. Dmitriev** Doctor of Science, Professor, Corresponding Member of the RAS, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Yulia Y. Eleneva** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Tadeusz Zaborovski** Doctor of Science, Professor, Poznan University of Technology (Poland)
- Yury V. Ilyukhin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Branko Katalinic** Doctor of Science, Professor, Vienna University of Technology (Austria)
- Georgiy B. Kleyner** Doctor of Science, Corresponding Member of the RAS, Vice2director of the Central Economic and Mathematical Institute of the RAS (Russia)
- Hans-Joachim Koriath** Doctor of Science, Head of department «Machine Tools & Automation» of Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology
- Andrey A. Kutin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Georgi Martinov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Yuriy V. Poduraev** Doctor of Science, Professor, Editor-in-Chief, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Boris M. Pozdneev** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Michail M. Stebulyanin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Janos Takacs** Doctor of Science, Professor, Budapest University of Technology and Economics (Hungary)
- Vladimir I. Teleshevskiy** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Ramon Torrecillas** Doctor of Science, Professor, Director of the Nanomaterials and Nanotechnology Research Center (CINN) of the Spanish Council for Scientific Research (CSIC) (Spain)
- Lyudmila A. Uvarova** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
-

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Милославский П.И. Построение конфигурируемого статического анализатора управляющих программ систем ЧПУ	8
Волков А.Э., Бирюков С.С. Распределение контактных давлений в модифицированной эвольвентной конической зубчатой передаче	13
Суханова Н.В., Шептунов С.А. Применение искусственных нейронных сетей для автоматизации тестирования программных средств	18
Бушева А.Г., Феофанов А.Н. Отбор участников в состав экспертных групп с помощью метода многокритериальной оптимизации.....	22

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Сингеев С.А., Ваулин В.И. Исследование средней контактной температуры резания при развертывании отверстий инструментом из композита 01	28
Домнин П.В. Математическое моделирование профиля шлицевого вала с помощью средств математического программирования в среде Mathcad.....	34
Домнин П.В. Определение схемы резания для процесса обработки фасонных винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля.....	38

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вартанов М.В., Петров В.К., Нгуен Ван Зунг, Чан Динь Ван Анализ условий заклинивания при роботизированной сборке с использованием силомоментного датчика	43
--	----

Стебулянин М.М., Пимушкин Я.И.

Решение уравнения Родрига в задачах моделирования объёмной геометрической точности многокоординатных технологических и измерительных систем..... 49

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**Зеленский А.А., Валюкевич Ю.А., Алепко А.В., Дубовсков В.В.**

Система управления перемещением платформы параллельного манипулятора с семью гибкими звеньями 56

Баранов М.В., Илюхин Ю.В., Корчагин О.А.

Модуль измерения угла и скорости движения мехатронных систем на основе конструктивного и алгоритмического объединения индукционного датчика и тахомашины 62

Махов А.А.

Исследование возможности программирования портативного робота MeArm на платформе Arduino в декартовой системе координат 70

УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЭКОНОМИКИ**Волков А.Э., Волкова Г.Л.**

Моделирование кривой спроса 76

Нехрест-Бобкова А.А., Бурдина А.А.

Построение МНК-оценки функции социально-экономического риска для участка нефтепровода 81

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ МГТУ «СТАНКИН»**Григорьев С.Н., Кузин В.В.**

Вклад учеников И.П. Третьякова в развитие науки о резании материалов..... 86

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Miloslavskiy P.I.**
Building a configurable static analyzer for CNC part-programs..... 8
- Volkov A.E., Biryukov S.S.**
Contact pressure distribution in modified involute bevel gearing 13
- Sukhanova N.V., Sheptunov S.A.**
The application of artificial neural networks for automation of testing 18
- Busheva A.G., Feofanov A.N.**
Selection of participants in expert groups using the method of multicriteria optimization 22

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

- Singeev S.A., Vaulin V.I.**
The study of the average contact temperature of cut when reaming the holes with a tool of the composite 01 28
- Domnin P.V.**
Mathematical modeling of the spline shaft profile using mathematical programming tools in the Mathcad environment 34
- Domnin P.V.**
Determination of the cutting pattern for the processing of shaped helical surfaces with a standard profile tool 38

TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

- Vartanov M.V., Petrov V.K., Van Dung Nguyen, Dinh Van Tran**
Analysis of jamming conditions in robotic assembly using the force-torque sensor..... 43
- Stebulyanin M.M., Pimushkin Ya.I.**
Solution of the Rodriguez equation in modeling volumetric geometric accuracy of multi-coordinate systems 49

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
Zelensky A.A., Valukevich U.A., Alepko A.V., Dubovskov V.V.

Platform movement control system of parallel manipulator with eight flexible links 56

Baranov M.V., Ilyukhin Yu.V., Korchagin O.A.

A module for measuring the angle and speed of motion of mechatronic systems based on a constructive and algorithmic combination of an induction sensor and a tachomachine 62

Makhov A.A.

Study of possibility of programming for portable robot-arm MeArm on Arduino platform in Cartesian coordinates 70

MANAGEMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES, MATHEMATICAL AND INSTRUMENTAL METHODS OF ECONOMICS
Volkov A.E., Volkova G.L.

Demand curve modeling 76

Nekhrest-Bobkova A.A., Burdina A.A.

The approximation of socio-economic risk function for oil pipeline with least-squares method 81

BY 90th ANNIVERSARY OF THE FOUNDATION OF MSUT «STANKIN»
Grigoriev S.N., Kuzin V.V.

The contribution of I.P. Tretyakov postgraduate students to development of metal cutting science 86

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 62-50:004.057.8

Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, П.И. Милославский
R.L. Pushkov, S.V. Evstafieva, P.I. Miloslavskiy

ПОСТРОЕНИЕ КОНФИГУРИРУЕМОГО СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ СИСТЕМ ЧПУ

BUILDING A CONFIGURABLE STATIC ANALYZER FOR CNC PART-PROGRAMS

В работе изложено исследование типов ошибок в управляющих программах современных систем ЧПУ, выявлена возможность возникновения не только синтаксических ошибок, но и потенциальных логических ошибок. Разработана архитектурная модель конфигурируемого статического анализатора управляющих программ, приведен пример его применения для СЧПУ «АксиОМА Контрол».

The paper describes a research of the types of errors in part-programs of modern CNC systems, reveals the possibility of not only syntax errors, but also potential logical errors. An architectural model of a configurable part-program static analyzer has been developed, an example of its application for the «AxiOMA Control» control system is given.

Ключевые слова: управляющая программа, система ЧПУ, синтаксический анализ, статический анализ, ошибки, станок, РБНФ, язык высокого уровня.

Keywords: part-program, CNC, syntax analysis, static analysis, errors, machine-tool, EBNF, high-level language.

Введение

Статический анализ кода — это технология поиска ошибок в программах путем разбора исходного кода и поиска в нем паттернов известных, наиболее распространенных ошибок. Результат работы статического анализатора — это список обнаруженных в коде потенциальных проблем с указанием имени файла и конкретной строки. В большинстве случаев анализ производится над какой-либо версией исходного кода.

Статический анализ актуален не только для языков программирования, но и для управляющих программ. Это становится возможным с развитием языков управляющих программ, появлением в них новых конструкций. В течение большого времени стандартом языка описания траектории движения инструмента и команд управления электроавтоматикой является язык ISO-7bit. Структура языка не предусматривает создания параметрических циклов. Повторное использование участков управляющей

программы посредством вызова из другой управляющей программы достаточно ограничено, это часто решается посредством многократного повторения одних и тех же фрагментов программы. Разработчики системы ЧПУ стали включать в свои системы поддержку отдельных синтаксических конструкций, присущих алгоритмическим языкам высокого уровня [1-4]. В результате современные языки управляющих программ стали алгоритмическими языками высокого уровня, а это может требовать дополнительных инструментов анализа.

Еще одна возможность использовать статический анализ для управляющих программ заключается в способности нахождения логических ошибок. Например, в управляющей программе существуют модальные функции, которые могут быть ошибочно введены в одном месте. Использование статического анализатора позволит получить список обнаруженных в программе ошибок с указанием конкретной строки.

Ошибки управляющих программ в СЧПУ

При разработке управляющих программ могут возникать разного рода ошибки.

Группа ошибок перемещений оси. Причина следующей группы ошибок может возникнуть, если на этапе интерполяции конечная точка кадра выходит за предел допустимых перемещений оси. Группа ошибок команд движения. Причина следующей группы ошибок может возникнуть при верификации команды движения на входе интерполятора. Если подача в команде движения задана нулем. Группа ошибок настройки функций. Причина следующей группы ошибок может возникнуть, при программировании в одном кадре двух несовместимых функций, а также при попытке задать постоянный цикл в кадре, содержащем нелинейное движение. Группа ошибок задания контура эквидистанты. Причина следующей группы ошибок может возникнуть, если запрограммирован выход из эквидистантного контура без входа в него. Группы знаковых ошибок. Причина следующей группы ошибок может возникнуть, если знак (-) был задан в команде ЧПУ или в системной переменной, где задание знака минус не разрешено. Так же к потенциальным (логическим) ошибкам относятся: несоответствие типов, выход за пределы массива, выход за пределы размерности типа, использование неинициализированных элементов массива.

Так как современные языки управляющих программ стали алгоритмическими языками высокого уровня, то статический анализ становится для них крайне актуален. Он поможет отследить возникающие группы ошибок, характерных для управляющих программ современных систем ЧПУ, вследствие чего сэкономит большое количество времени оператору

для их дальнейшего устранения. В современных языках программирования есть все нужные инструменты, чтобы построить статический анализатор управляющих программ (УП). Вследствие этого можно разработать конфигурированный программный модуль, который позволит применять данный анализатор кода для разных языков систем ЧПУ.

Разработка архитектурной модели статического анализатора кода УП для СЧПУ

В архитектурной модели (рис. 1) статического анализатора кода УП для СЧПУ [5] показаны компоненты статического анализатора и способы их взаимодействия друг с другом. Конфигурационный модуль содержит описание правил языка управляющих программ. Математическим аппаратом в данном модуле является расширенная форма Беккуса-Наура (РБНФ). Модуль лексического анализа предназначен для разбиения входных управляющих программ на описанные токены (минимальная лексическая единица языка УП). Состоит из класса GrammarLexer, который наследует и переопределяет необходимые методы из класса Lexer. Для обеспечения возможности работы с разными языками УП модуль может быть расширен соответствующими правилами. Модуль синтаксического анализа состоит из класса GrammarParser, который наследует и переопределяет необходимые методы из класса Parser. Использует полученные токены и строит синтаксическое дерево разбора для проверки заданной структуры кода управляющих программ. Модуль семантического анализа состоит из класса SemanticAnalysis и интерфейса RegularExpressionConstants, в котором находятся необходимые константы. В нем описываются правила поиска логических ошибок, которые основываются на регулярных выражениях.

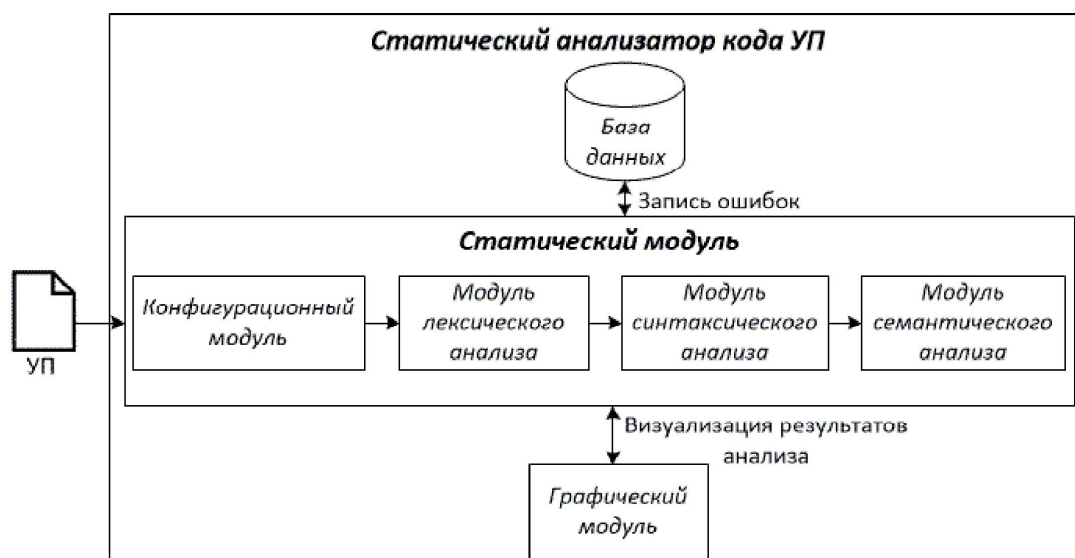


Рис. 1. Архитектурная модель статического анализатора кода

Графический модуль состоит из класса AppFrame. В нем находится главный фрейм (JFrame) на котором размещаются необходимые компоненты, такие как кнопки, текстовые поля, меню-бар (JMenuBar), лейблы (JLabel). База данных в разрабатываемом приложении нужна для хранения различного рода ошибок (логов).

Построение конфигурации для выявления ошибок на примере СЧПУ «АксиОМА Контрол»

Для определения групп потенциальных ошибок необходимо выделить комбинацию слов и кадров языка управляющих программ «АксиОМА Контрол», являющихся допустимыми. Один из возможных вариантов — использование регулярных выражений. Они позволяют произвести поиск возможных ошибок. Далее шаблоны регулярных выражений используются для поиска недопустимых конструкций в управляющей программе.

РБНФ — формальная система определения синтаксиса, в которой одни синтаксические конструкции последовательно определяются через другие. Расширенная форма Бэкуса-Наура необходима для описания контекстно-свободных формальных грамматик [6].

В расширенной форме Бэкуса-Наура для описания грамматики необходим набор правил, определяющих отношения между терминальными символами и нетерминальными символами. Терминальные символы представляют собой минимальные элементы грамматики, не имеющие собственной структуры. Нетерминальные символы представляют собой элементы грамматики, у которых есть собственные имена и структура. Любой нетерминальный символ состоит из одного или более терминальных и (или) нетерминальных символов, представление которых определяется правилами грамматики.

В расширенной форме Бэкуса-Наура нет никаких специальных предписаний относительно порядка записи правил, но такие предписания могут вводиться при использовании РБНФ программными средствами с автоматической генерацией программ синтаксического разбора по описанию грамматики.

Используя анализ синтаксических конструкции языка управляющих программ системы «АксиОМА

Контрол» и применяя расширенную форму Бэкуса-Наура, получаем следующий набор формальных правил (показано для нескольких алгоритмических циклов):

```

<оператор> = (<цикл_for> / <цикл_while>
/ <ветвление> / <переход> / <присваивание> /
<кадр_ISO_7bit> «;»
<присваивание> = <идентификатор> «=» <выражение>
<цикл_for> = «for» («<присваивание> «;» <условие> «;» <выражение> «)» «{» *<оператор> «}»
<условие> = (<идентификатор> / <десятичное_число> / <строка> / <символ>) * (<логическая_операция>
(<идентификатор> / <десятичное_число> / <строка> / <символ>))
<цикл_while> = «while» («<условие> «)» «{» *<оператор> «}»
<ветвление> = «if» («<условие> «)» «{» <оператор> «}» [«else» «{» *<оператор> «}»]
<переход> = «goto» <идентификатор>
    
```

Далее составленную расширенную форму Бэкуса-Наура, можно реализовать программно. Для этого необходимо использовать фреймворк ANTLR [7], который позволяет использовать расширенную форму в специальном формате .g4 для автоматизации построения программных классов, позволяющих работать с описанными синтаксическими конструкциями.

В результате перевода РБНФ в формат .g4 получается фрагмент программной реализации, представленный на рисунке 2.

Тестирование работы статического анализатора

Для тестирования работы статического анализатора необходимо загрузить в него управляющую программу. Загрузка управляющей программы происходит в главном меню статического анализатора.

После нажатия кнопки «Structure» в статическом анализаторе произойдет проверка структуры, и полученный результат отобразится в нижнем окне вывода (Рис. 3).

После проверки структуры управляющей программы и исправления возможных ошибок можно приступить к поиску потенциально возможных

```

<operator> = (<cycle_for> | <cycle_while> | <branching> | <transition> | <assignment> | <frame_ISO_7bit>).
<assignment> = <identifer> '=' <expression>.

<cycle_for> = '<for>' <'(' <assignment> <', '> <condition> <', '> <expression> <')>' <'{' <operator> <'}'>.
<condition> = (<identifer> | <decimal_number> | <string> | <char>) (<logic_operation> (<identifer> |
<decimal_number> | <string> | <char>)).
<cycle_while> = '<while>' <'(' <expression> <')>' <'{' <operator> <'}'>.
<branching> = '<if>' <'(' <condition> <')>' <'{' <operator> <'}'> <'else>' <'{' <operator> <'}'>.
<transition> = '<goto>' <identifer>.
    
```

Рис. 2. Фрагмент программной реализации РБНФ в формате фреймворка ANTLR

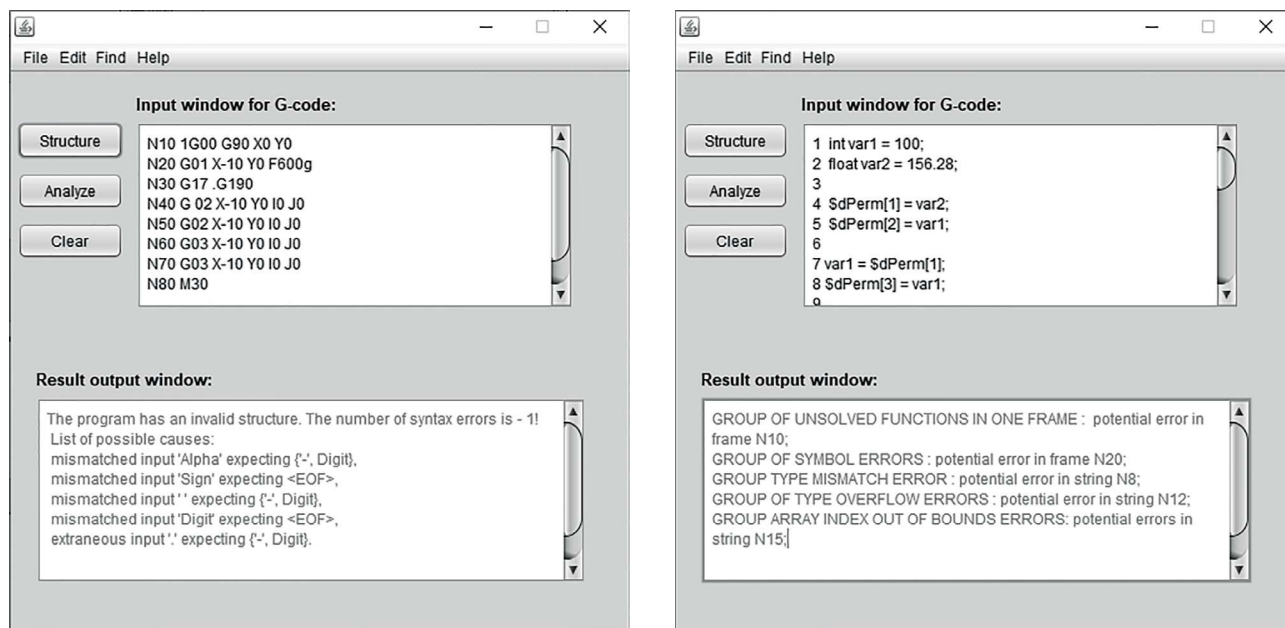


Рис. 3. Результаты анализа при наличии ошибки и статического анализа расширенной программы

ошибок. Они описаны в модуле логического анализа. Для демонстрации возможностей статического анализатора необходимо расширить управляющую программ, добавив в нее переменные различных типов, обращение к системным переменным.

Вследствие анализа в окне вывода отображаются потенциальные ошибки, которые необходимо устранить. В окне вывода приводятся типы ошибок и указание на конкретную строку УП их возникновения.

Выводы

Полученные результаты тестирования позволяют сделать вывод, что примененный к управляющей программе системы ЧПУ метод статического анализа позволяет получить в результате анализа список потенциальных логических ошибок в управляющих программах, на которые оператору или программисту имеет смысл обратить внимание при разработке. На ранних этапах разработки управляющих программ исправление подобных ошибок позволяет ускорить процесс внедрения программы в производство и избежать в дальнейшем финансовых потерь из-за получения брака и простоя оборудования в процессе поиска ошибок в управляющей программе, ставших причиной брака. При расширении системы ЧПУ для управления оборудованием с динамически изменяющейся кинематикой набор необходимых правил для статического анализа УП также может быть дополнен и расширен [8-11].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00305/20.

Библиографический список

1. **Евстафиева С.В., Червоннова Н.Ю., Кудинов О.А.** Особенности применения параметрического программирования при создании управляющих программ для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол». Труды XVI-ой международной молодежной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016). Под ред. А.В.Толока. М.: ООО «Аналитик». –2016. С. 57–60.
2. **Мартинов Г.М., Пушков Р.Л.** Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 11. С. 19–24.
3. **Пушков Р.Л., Саламатин Е.В., Евстафиева С.В.** Практические аспекты применения языка высокого уровня в системе ЧПУ для реализации групповой обработки // Автоматизация в промышленности, № 5. 2018. С.31–34.
4. **Пушков Р.Л., Саламатин С.В., Евстафиева С.В.** Применение языка высокого уровня СЧПУ «АксиОМА Контрол» для реализации цикла групповой обработки. Труды XVII-ой международной научно-практической конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017). Под общ. ред. А.В.Толока. Ин-т проблем упр. им. В.А.Трапезникова. – Электрон. текстовые дан. – М. : ИПУ РАН, 2017. С. 94–98

5. **Мartiнов Г.М., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В.** Основы построения однокомпьютерной системы ЧПУ с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 4. С. 82–93.
6. **Crocker D., Ed., Overall P.** Augmented BNF for Syntax Specifications: ABNF. RFC 5234 (<http://tools.ietf.org/html/rfc5234>).
7. ANTLR [Электронный ресурс]: офиц. сайт. // ANTLR 4 Documentation: <https://www.antlr.org/about.html> (дата обращения 27.04.2021).
8. **Мartiнов Г.М., Пушков Р.Л., Соколов С.В., Обухов А.И., Евстафиева С.В.** Числовое программное управление станками с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, № 5. 2020. С. 12–17. DOI: 10.25728/avtprom.2020.05.02
9. **Любимов А.Б., Martинов Г.М., Martинова Л.И., Пушков Р.Л.** Построение цифровой управляющей платформы для технологического оборудования с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, № 5. 2021. С. 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.05.01
10. **Martinov, G.M., Sokolov, S.V., Pushkov, R.L., Obukhov, A.I., Evstafieva, S.V.** Control of the machine tools with variable kinematics. Int J Adv Manuf Technol (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07339-1>
11. **Martinov G., Kozak N. and Evstafieva S.** Implementation of Dynamic Changes in Machine Kinematics in the Electroautomatic Subsystem of the CNC System. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 596–601, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446459.

Пушков Роман Львович — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
pushkov@ncsystems.ru

Евстафиева Светлана Владимировна — старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
svetlana.evstafieva@gmail.com

Милославский Павел Игоревич — магистрант группы АДМ-19-04 кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
swon-more@mail.ru

Pushkov Roman Lvovich — candidate Sc. of Engineering, assistant professor of Department of Computer-Architecture Control Systems of MSUT «STANKIN»
pushkov@ncsystems.ru

Evstafieva Svetlana Vladimirovna — lecturer of Department of Computer-Architecture Control Systems of MSUT «STANKIN»
svetlana.evstafieva@gmail.com

Miloslavskiy Pavel Igorevich — master degree student group ADM-19-04 of Department of Computer-Architecture Control Systems of MSUT «STANKIN»
swon-more@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕ

CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION IN MODIFIED INVOLUTE BEVEL GEARING

В статье рассмотрены прямозубые эвольвентные конические передачи с локализованным контактом. На их примере представлена методика управления локализованным контактом на этапе технологической подготовки производства зубчатых передач. Цель методики — минимизация контактных давлений при отсутствии кромочного контакта. Расчет контактных давлений основан на решении Герца контактной задачи теории упругости. Прослежено изменение положения мгновенного контактного эллипса на разных фазах зацепления. Даны примеры расчёта мгновенных контактных площадок с их детализацией на фазах однопарного и двухпарного контакта.

The article deals with straight involute bevel gears with localized contact. Using them as an example the method of localized contact control at the stage of technological preparation of gear production is presented. The aim of the method is to minimize contact pressures in the absence of edge contact. The change of position of the instantaneous contact ellipse at different phases of meshing is traced. Examples are given for the calculation of instantaneous contact areas with their detailing on the phases of single and double pair contact.

Ключевые слова: прямозубые конические передачи, управление локализацией контакта, мгновенная контактная площадка, решение Герца, пятно контакта под нагрузкой.

Keywords: straight bevel gears, contact localization control, instantaneous contact area, Hertz solution, bearing contact.

Введение

Проектировочный расчет зубчатой передачи обычно проводится конструктором без учета реальной поверхности зубьев с помощью простых, но приближенных соотношений. При изготовлении передачи технолог сталкивается с целым рядом производственных проблем, связанных с реализацией спроектированной передачи на конкретном оборудовании. Одной из таких проблем является минимизация влияния неизбежных погрешностей изготовления и монтажа передачи. Она может быть решена путем изменения теоретически точного зацепления с линейным контактом и введения отводов для локализации контакта и устранения возможного кромочного контакта.

Поэтому важной задачей является разработка методики управления локализованным контактом на этапе технологической подготовки производства зубчатых передач. В статье дана укрупненная схема управления локализованным контактом на примере прямозубых эвольвентных конических передач.

С развитием техники стало возможным воспроизводить на станках с ЧПУ требуемую боковую поверхность зубьев. В связи с этим появилась необ-

ходимость еще на этапе синтеза зубчатой передачи предусмотреть локализацию контакта за счет модификации формы эвольвентных конических поверхностей. Так как решение задачи локализации контакта неоднозначно, то авторы в рамках управления локализованным контактом сформулировали и решили задачу условной оптимизации контактных давлений в передаче. В статье также детализировано распределение контакта зубьев на отдельных фазах зацепления с учетом возможного многопарного контакта.

Построение боковых поверхностей зубьев

Рассматривается синтез прямозубых конических передач, в которых боковые поверхности зубьев построены на основе конической эвольвентной поверхности. Передачи с эвольвентным зацеплением обеспечивают точное зацепление и линейный контакт зубьев. Для описания поверхности вводится правая декартова система координат: начало системы координат совпадает с вершиной делительного конуса, ось z направлена по оси вращения зубчатого колеса, ось x направлена так, чтобы ребро возврата конической эвольвентной поверхности было расположено в плоскости Oxz .

Обозначим параметры, относящиеся к шестерне индексом 1, а к сателлиту — индексом 2. Тогда расчёт координат эвольвентной конической поверхности проводится следующим образом [1] ($i=1,2$)

$$\begin{aligned} x_i &= L(\sin\phi_i \sin\psi_i + \cos\phi_i \cos\psi_i \sin\delta_{bi}) \\ y_i &= L(-\cos\phi_i \sin\psi_i + \sin\phi_i \cos\psi_i \sin\delta_{bi}) \\ z_i &= L\cos\psi_i \cos\delta_{bi} \end{aligned} \quad (1)$$

где ψ_i определяется так

$$\psi_i = \phi_i \cos\delta_{bi} \quad (2)$$

Здесь L — конусное расстояние; параметр ϕ_i сферической эвольвенты i -го колеса на сфере радиусом L ; δ_{bi} — угол основного конуса, связанный с углом α профиля и углом δ_i делительного конуса соотношением

$$\sin\delta_{bi} = \cos\alpha \cdot \sin\delta_i \quad (3)$$

Для локализации контакта боковые поверхности зубьев ведомого колеса отклоняются от теоретической (эвольвентной) поверхности на величину отвода в двух направлениях: образующей делительного конуса и перпендикулярно ей. Оптимальное расположение и размеры пятна контакта определены в ГОСТ 1758- 81. Тогда под нагрузкой, даже с учетом погрешностей, оно не будет выходить на кромки.

Для управления локализацией контакта введены параметры синтеза (см. рис. 1), которые определяют форму боковых поверхностей зубьев и, следовательно, отвечают за форму и расположение пятна контакта [2]. Параметры L_c и d задают положение центра пятна контакта (точка P); полуось a_0 мгновенного эллипса контакта определяет величину продольной модификации, а параметр C — это коэффициент профильной модификации.

Для получения поверхности с отводами каждую ее точку смещают вокруг оси вращения на угол, равный сумме величин профильной $\Delta\theta_1$ и продольной $\Delta\theta_L$ модификации. Углы рассчитываются так

$$\Delta\theta_L = -\varepsilon / r [(L - L_c) / a_0]^2; \quad (4)$$

$$\Delta\theta_1 = -C(\varphi - \varphi_0)^2. \quad (5)$$

Здесь φ_0 — значение параметра φ , соответствующее центру пятна контакта; r — расстояние от текущей точки поверхности до оси вращения шестерни.

Модифицированная активная поверхность зуба шестерни определяется соотношениями

$$x_1^* = x_1 \cos\Delta\theta_m - y_1 \sin\Delta\theta_m; \quad y_1^* = x_1 \sin\Delta\theta_m + y_1 \cos\Delta\theta_m; \quad z_1^* = z_1 \quad (6)$$

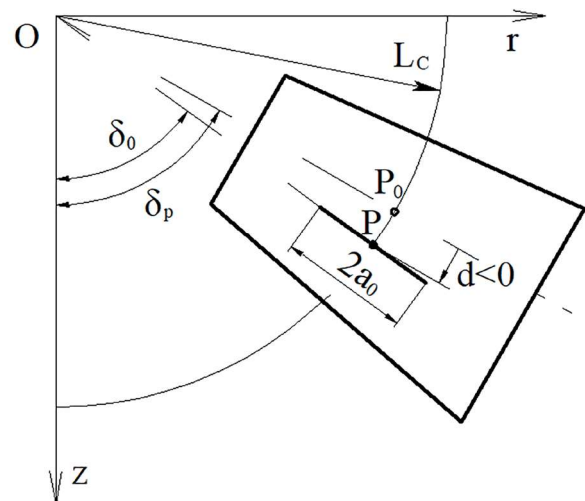


Рис. 1 Параметры синтеза

где

$$\Delta\theta_m = \Delta\theta_L + \Delta\theta_1.$$

Поверхность зуба сателлита не модифицируется, поэтому

$$x_2^* = x_2; \quad y_2^* = y_2; \quad z_2^* = z_2 \quad (7)$$

Уравнения (6), (7) определяют активные боковые поверхности зубьев колес. По этим уравнениям строятся 3D-модели зубчатых колес, которые необходимо изготовить.

Управление локализацией контакта

На этапе технологической подготовки производства зубчатых передач технолог должен определить ту форму боковых поверхностей зубьев, при которой будут удовлетворены требования к передаче. С этой целью сформулирована и решена задача условной оптимизации. Суть задачи состоит в том, что определяются значения параметров синтеза, при которых максимальное контактное давление в передаче принимает наименьшее значение, и одновременно отсутствует опасность кромочного контакта.

Максимальное контактное давление на каждой фазе φ рассчитывается с помощью решения Герца задачи теории упругости о контакте двух тел, ограниченных поверхностями второго порядка [3], и зависит от параметров синтеза

$$\sigma_H(\varphi) = \sigma_H(L_c, d, a_0, C, \varphi) = \frac{3P}{2S}.$$

Здесь P — нормальная сила взаимодействия между зубьями, рассчитываемая для каждой фазы φ ; S — площадь мгновенного контактного эллипса на той же фазе. Сила P зависит от передаваемого момента M_0 следующим образом

$$P = M_0 / (r \cos\alpha) \quad (8)$$

Искомым максимальным контактным давлением в передаче является наибольшее значение на всех фазах зацепления

$$\sigma_{H\max} = \max_{\varphi} \sigma_H(\varphi).$$

Для решения задачи оптимизации разработан эвристический алгоритм, подробно изложенный в работах [2, 4]. Кратко суть его состоит в следующем. Сначала определяются значения параметров L_c и a_0 из условия размещения пятна контакта в центральной части боковой поверхности зуба с заданной продольной локализацией. Далее решается задача нахождения минимума целевой функции

$$f(d, C) = \sigma_{H\max} \quad \text{с ограничениями вида} \\ g_i(d, C) \geq 0, i = 1 \dots n; \quad (9)$$

где n — число ограничений. В качестве начального приближения выбирается точка (d', C') , для которой выполняются неравенства (9). На каждой итерации рассматривается 12 кандидатов на продолжение поиска решения. Они выбираются равномерно вокруг точки (d', C') с некоторым шагом.

Среди точек-кандидатов выбираются удовлетворяющие ограничениям (9). Для них вычисляется значение целевой функции $f(d_k, C_k)$ и сравнивается со значением в точке начального приближения $f(d', C')$. Окончательно выбирается точка с наименьшим на данной итерации значением $f(d_k, C_k)$, для которой выполняется условие

$$f(d_k, C_k) < f(d', C').$$

Она становится начальным приближением на следующей итерации. Если же такой точки найти не удастся, то шаги для выбора точек-кандидатов уменьшаются вдвое. Процесс продолжается до тех пор, пока какой-нибудь из шагов не станет меньше наперед заданного числа.

В результате целенаправленного управления локализацией контакта определяются значения параметров синтеза, а следовательно, форма боковых поверхностей зубьев, обеспечивающих локализацию контакта и минимизацию контактных давлений.

Расчет контактного давления при двухпарном контакте

Исследованию многопарного контакта посвящены работы многих ученых [5, 6, 7]. В прямозубых передачах максимальная парность контакта равна двум.

При двухпарном контакте необходимо учесть распределение передаваемого момента между двумя парами одновременно работающих зубьев

$$M_0 = M_1 + M_2 \quad (10)$$

Нижний индекс 1 относится к паре, вступающей в контакт первой, а индекс 2 — второй. Расчет значений M_1 и M_2 осуществляется в соответствии с моделью, представленной в работах [8]. Моменты M_1 и M_2 связаны с упругим сближением $w_{\tau 1}$ в окружном направлении соотношениями

$$M_1 = C_1 w_{\tau 1}^{3/2}; \quad M_2 = C_2 [(w_{\tau 1} - \Delta) r_2 / r_1]^{3/2} \quad (11)$$

В соотношениях (11) C_1 и C_2 — жесткость, соответствующая двум парам одновременно контактирующих зубьев; Δ — зазор между поверхностями зубьев пары 2 в момент касания поверхностей первой пары при ничтожно малой нагрузке.

Соотношение (10) с учетом (11) представляет собой уравнение относительно упругого сближения $w_{\tau 1}$ по дуге окружности радиусом r_1 .

Связь между упругим сближением $w_{\tau 1}$ в окружном направлении и некоторыми характеристиками контакта описывается следующими соотношениями [9]:

$$P = \gamma w_{\tau 1}^{3/2}; \quad a = \chi P^{1/3}; \quad b = \mu a; \quad M_1 = C_1 w_{\tau 1}^{3/2}$$

Здесь M_1 — момент, передаваемый рассматриваемой парой зубьев. Значения коэффициентов γ , χ , μ , C_1 зависят от фазы φ зацепления. Расчет указанных коэффициентов дан в работе [10].

Приведенные соотношения позволяют найти максимальное контактное давление на фазах двухпарного контакта. При этом в соотношении (8) вместо заданного момента M_0 нужно подставить значение M_1 или M_2 .

Описанная выше методика реализована в виде программного комплекса, что позволяет, в частности, проследить изменение положения мгновенного эллипса контакта на фазах однопарного и двухпарного контакта.

Пример

Рассмотрим зубчатую передачу с числами зубьев 15 и 30. Её основные геометрические параметры: $m_c = 5$ мм; $b = 25$ мм; $x_1 = 0,4$. Передаваемый момент на валу сателлита 120 Нм. Прочностные параметры материала таковы: $E = 210000$ МПа; $\nu = 0,3$.

При значениях параметров синтеза: $L_c = 71$ мм; $\Delta h = -0,9$ мм; $a_0 = 9$ мм; $C = 0,011$ получено пятно контакта (рис.2) и максимальное контактное давление в передаче 1218 МПа. На пятне контакта (рис. 2) отмечены две точки. Нижняя — это центр пятна контакта, верхняя — точка, в которой достигается максимальное контактное давление.

Ниже на рис. 3–5 представлены 3D-модели трёх соседних зубьев шестерни. Рассматривается период зацепления одной текущей пары зубьев. Эти зубья расположены на рисунках посередине. Точками показаны границы пятна контакта на боковой поверхности зуба. Программный комплекс позволяет проследить изменение положения мгновенного эллипса контакта в процессе зацепления зубьев.

При входе текущего зуба в зацепление имеет место двухпарный контакт, т. к. одновременно контактирует другая пара зубьев. На боковой поверхности зуба шестерни мгновенный эллипс контакта располагается вблизи ножки зуба. Например, на рис. 3 на среднем зубе темным отрезком у ножки показан мгновенный эллипс контакта на фазе $\varphi = -0,1833$ рад. На этой же

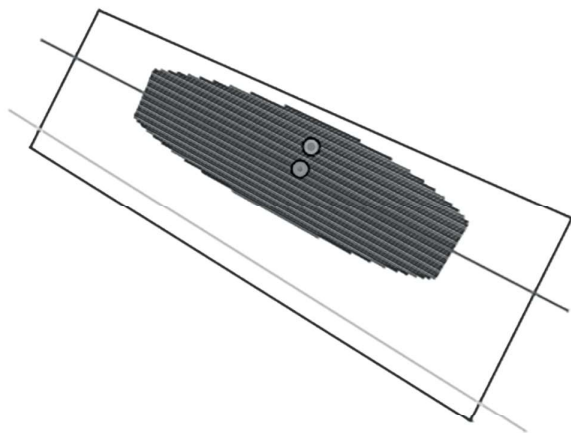


Рис. 2. Пятно контакта на зубе шестерне

фазе контактирует предыдущая пара зубьев, выходящая из зацепления. На рис. 3 на первом зубе длинной темной линией выделен мгновенный эллипс контакта на выходе из зацепления вблизи головки зуба шестерни.

На рис. 4 на среднем зубе темной линией отмечен мгновенный эллипс контакта в средней фазе зацепления при $\varphi = -0,0982$ рад. Здесь имеет место однопарный контакт. С ростом угла φ мгновенный эллипс контакта перемещается в сторону головки зуба шестерни.

На фазе $\varphi = 0,0785$ на выходе из зацепления имеет место двухпарный контакт (рис. 5). Текущая пара зубьев (средний зуб) выходит из зацепления, в то время как следующая пара зубьев вступает в зацепление. Мгновенный контактный эллипс на следующем зубе расположен у ножки зуба.

Приведённая в статье методика расчёта прямозубых конических передач основана на целенаправленном управлении локализацией контакта. Она реализована в виде программного комплекса, который позволяет решать следующие задачи: вычисление интегральных характеристик, таких как суммарное пятно контакта при заданной нагрузке и максимальное контактное давление в передаче, полученное в результате решения задачи условной оптимизации. Также программный комплекс дает возможность рассчитывать характеристики контакта на каждой фазе зацепления. В этом случае определяется парность контакта, контактное давление, положение и размер мгновенного эллипса контакта. В случае двухпарного контакта дается распределение передаваемого момента на две пары одновременно контактирующих зубьев и визуализация мгновенных контактных эллипсов.

Эти возможности программного комплекса будут полезны конструкторам и технологам при создании новых передач, устойчивых к разнообразным погрешностям.

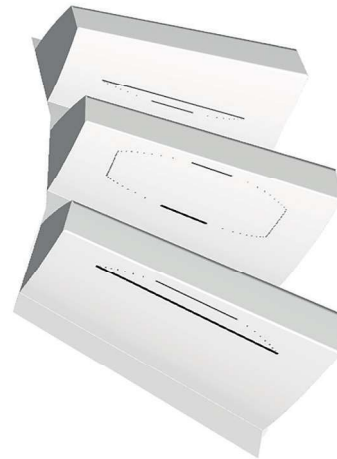


Рис. 3. Мгновенные эллипсы контакта на зубьях шестерни при двухпарном контакте на входе в зацепление



Рис. 4. Мгновенный эллипс контакта на зубе шестерни при однопарном контакте



Рис. 5. Мгновенные эллипсы контакта на зубьях шестерни при двухпарном контакте на выходе из зацепления

Библиографический список

1. **Колчин Н.И.** Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений (с приложением к профилированию режущего инструмента и расчету погрешностей в зацеплениях). М.-Л.: Машгиз. 1949. С. 19–95.
2. **Волков А.Э., Лагутин С.А., Бирюков С.С.** Программный комплекс для расчета прямозубых конических передач с локализованным контактом // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Том 18, № 3. С. 77–84.
3. **Работнов Ю.М.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. 744 с.
4. **Medvedev, V., Matveenko, D., Volkov, A.** Reduction of Contact and Bending Stresses in the Bevel Gear Teeth While Maintaining the Same Overall Dimensions // «Advanced in Mechanical Engineering», Lecture Notes in Mechanical Engineering 51. 2019. Springer Nature Switzerland AG, P. 35–52.
5. **Волков А.Э.** Анализ нагруженной зубчатой передачи с учетом одновременной работы трех пар зубьев // Проблемы машиностроения и надежности машин, № 6, 2000. С.92–100.
6. **Simon, V.** Load Distribution in Hypoid Gears // ASME J Mech Des 122. 2000. P. 529–535.
7. **Trubachev, E., Kuznetsov, A., Sannikov, A.** Model of Loaded Contact in Multi-pair Gears // «Advanced Gear Engineering», Mechanisms and Machine Science 51, Springer International Publishing AG Switzerland. 2018. P. 45–72.
8. **Medvedev, V., Volkov, A., Volosova, M., Zubelevich, O.** Mathematical model and algorithm for contact stress analysis of gears with multi-pair contact. // Mechanism and Machine Theory. 2015. Т. 86. P. 156–171.
9. **Волков А.Э., Медведев В.И.** Исследование многопарного контакта твердых тел периодической структуры // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 1 (32). С. 21–26.
10. **Medvedev, V., Volkov, A., Biryukov, S.** Automation of Technological Preproduction of Straight Bevel Gears // New Approaches to Gear Design and Production / Series: Mechanisms and Machine Science, Springer Switzerland AG, 2020. 81. P. 133–155.

Волков Андрей Эрикович – д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
volkov411@gmail.com

Бирюков Сергей Сергеевич – аспирант кафедры информационных технологий и вычислительных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
bserg1234@mail.ru

Volkov Andrey Erikovich – D.Sc. in Engineering, prof., prof. of department of «Theoretical mechanics and strength of materials» at MSUT «STANKIN»
volkov411@gmail.com

Biryukov Sergey Sergeevich – post-graduate of department «Information Technology and Computer Systems» at MSUT «STANKIN»
bserg1234@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR AUTOMATION OF TESTING

Программные средства АСУ в машиностроении отличаются большим объемом данных и сложными алгоритмами их обработки. Цель исследования – автоматизация тестирования программных средств. Методы исследования – моделирование, искусственные нейронные сети. Предложены новые нейросетевые модели для автоматизации тестирования. Модели реализованы на базе коммутаторных нейронных сетей. Коммутаторная структура нейронных сетей позволяет изменять, дополнять, усложнять тесты, задавать и изменять последовательность их выполнения.

The automation control systems software tools in mechanical engineering are distinguished by the large amount of data and complex algorithms for their processing. The purpose of the study is to automate testing of software tools. Research methods - modeling, artificial neural networks. The new neural network models for testing automation control systems are proposed. Models are realized on the basis of the switching neural networks. The switching structure of neural networks allows you to modify, supplement, complicate tests, set and change the sequence of their execution.

Ключевые слова: тестирование, программные средства, коммутаторная структура, искусственные нейронные сети, нейросетевая модель.

Keywords: testing, software, switching structure, artificial neural networks, neural network model.

1. Актуальность

В состав современных автоматизированных систем управления входят технические и программные средства. Программные средства являются результатом интеллектуальной деятельности человека-разработчика и могут содержать ошибки в кодах. Ошибки в программных средствах приводят к отказам АСУ, простоя дорогостоящего оборудования, могут создавать опасную ситуацию на объекте управления.

Одним из этапов жизненного цикла программных средств является тестирование. Тестирование – это испытание программных средств с целью выявления в них ошибок. Тестирование заключается в выполнении набора тестовых примеров. Затраты на этапе тестирования составляют более 70 % от общей стоимости разработки программных средств [1–3].

Известны разные методы тестирования:

- методы «черного», «белого» и «серого» ящиков,
- модульное, интеграционное и комплексное тестирование,
- стресс-тестирование и др. [1–3].

Одним из методов тестирования является функциональное тестирование, когда проверяется соответствие требованиям к программным средствам, выполнение функций, описанных в техническом за-

дании. Программные средства АСУ в машиностроении отличаются большим объемом входных данных и сложными алгоритмами их обработки. Автоматизация тестирования программных средств позволяет сократить затраты времени и средств.

Развитие методов искусственного интеллекта позволяет разрабатывать и использовать новые нейросетевые модели на базе искусственных нейронных сетей (ИНС). Разработка новых нейросетевых моделей для автоматизации тестирования программных средств является важной и актуальной задачей, позволит сократить инновационный цикл и затраты на разработку АСУ в машиностроении.

2. Объект, предмет, цель исследования

Объект исследования – программные средства АСУ в машиностроении.

Предмет исследования – тестирование программных средств.

Цель исследования – автоматизация тестирования, сокращение времени и затрат на тестирование программных средств АСУ.

Ожидаемый результат – применение нейросетевых моделей должно сократить время тестирования и уменьшить затраты на разработку программных средств.

Использованы методы моделирования, искусственного интеллекта, ИНС с коммутаторной структурой [4, 5].

3. Разработка нейросетевых моделей для автоматизации тестирования программных средств

Программные средства АСУ в машиностроении имеют сложную структуру и включают большое количество компонентов, в том числе — процедур, функций, библиотек, классов и объектов. Компоненты программных средств могут разрабатываться на разных языках и использовать различные технологии и методы программирования и проектирования. Взаимные связи компонентов программных средств характеризуются большой сложностью. Тестирование таких программных средств методами «белого» или «серого» ящика нецелесообразно, т.к. эти методы требуют анализа структуры кода и проверки всех взаимных связей между его компонентами и элементами.

Предложено использовать при тестировании метод «черного ящика», который также называется «тестированием на основе требований». «Черный ящик» — это модель объекта с неизвестной структурой, когда задают входные данные и проверяют корректность выходных данных. Метод «черного ящика» является универсальным и подходит для тестирования программных средств с разным уровнем сложности. Тесты методом «черного ящика» используют требования, которые формируются на основе анализа функций аналогичных программных средств. Методом «черного ящика» проверяют все функции, которые перечислены в техническом задании на разработку.

Тестирование программных средств является одним из этапов жизненного цикла. Современные эволюционные и итерационные модели жизненного цикла включают многократное выполнение этапов тестирования для каждой новой версии программных средств. Выпуск новой версии связан с добавлением и расширением набора реализуемых функций, с выявлением и исправлением ошибок в программных средствах.

Для каждой последующей версии программных средств набор тестов изменяется, расширяется и усложняется, дополняется новыми примерами. От версии к версии объем необходимых тестов увеличивается.

Предлагается автоматизировать тестирование с применением нейросетевой модели программных средств. Модель реализована на базе обученной ИНС. Применение ИНС с традиционной структурой ограничено их высокой стоимостью. Каждая итерация тестов требует синтеза новой нейросетевой модели для автоматизации тестирования, что увеличивает затраты и стоимость программных средств.

Для тестирования сложных программных средств АСУ в машиностроении требуются нейросетевые мо-

дели на базе ИНС с большим количеством нейронов. Применение больших ИНС с традиционной структурой ограничено из-за сложности синтеза и обучения ИНС и их высокой стоимости.

Предложены новые нейросетевые модели для автоматизации тестирования на базе коммутаторных искусственных нейронных сетей [4, 5], см. рис. 1. Коммутаторная структура нейронных сетей позволяет изменять, дополнять и усложнять набор тестов, задавать и изменять порядок выполнения тестов.

Тесты содержат наборы входных и выходных данных. Входные и выходные данные тестирования задаются с помощью групп входных и выходных нейронов. Группы входных и выходных нейронов подсоединяются к коммутатору и реализуют тестовый пример. Тестовая процедура состоит в том, чтобы сформировать входные данные, получить выходные данные и сравнить их с ожидаемыми тестовыми значениями.

Коммутаторная структура позволяет строить нейросетевую модель итерационно, путем последовательного синтеза фрагментов искусственных нейронных сетей. Фрагменты нейронных сетей обучаются независимо друг от друга, а затем соединяются с помощью коммутаторов. Каждый фрагмент коммутаторной нейронной сети реализует набор тестов для проверки одной из функций или для выявления одного из возможных отказов программных средств. Таким образом, путем комбинирования уже имеющихся и создания новых тестов реализуется нейросетевая модель (см. рис. 1).

Результаты обучения фрагмента ИНС записаны в памяти коммутатора в форме таблицы взаимных связей нейронов. Эту таблицу можно копировать в память других коммутаторов и таким образом экспортировать и тиражировать результат обучения ИНС, без необходимости повторного синтеза нейронной сети. Коммутаторная структура позволяет изменять взаимные связи коммутаторов и нейронов путем записи информации в память коммутаторов.

Изменение и усложнение нейросетевой модели происходит путем добавления к уже обученной нейронной сети дополнительных коммутаторов и новых обученных фрагментов ИНС. Коммутаторная нейронная сеть позволяет вносить изменения и совершенствовать уже разработанную модель, изменять ее функции и свойства. Коммутаторная структура нейронных сетей исключает необходимость повторного синтеза и обучения всей нейронной сети, что сокращает время обучения, затраты на реализацию модели и должно дать большой экономический эффект.

Использование нейросетевой модели упрощает выполнение тестов, позволяет автоматизировать тестирование, сокращает затраты времени и средств на тестирование.

Коммутаторная архитектура построения нейросетевой модели позволяет расширять функциональные

возможности, подключать дополнительные и отключать избыточные фрагменты ИНС.

Изменение взаимных связей нейронов и коммутаторов необходимо в следующих случаях:

- на одном аппаратно-программном комплексе реализуют разные нейросетевые модели,
- при изменении или расширении функций АСУ требуется подключение дополнительных коммутаторов и нейронов,
- при изменениях в порядке выполнения тестов.

Нейросетевая модель позволяет автоматизировать тестирование, выявить наборы тестов, при которых происходят отказы.

4. Избыточность нейросетевой модели

В структуру нейросетевой модели добавляют избыточные коммутаторы и нейроны.

Избыточные коммутаторы и нейроны используются в следующих случаях, когда требуются дополнительные тесты:

- при изменении и расширении функций АСУ,
- при изменении структуры АСУ,
- при обнаружении и исправлении отказов программных средств,
- при выпуске новой версии программных средств,
- при испытаниях новой конфигурации [6, 7].

Нейросетевые модели для автоматизации тестирования обладают следующими преимуществами:

1. Модель имеет адаптивную, гибкую, программируемую структуру связей между нейронами и коммутаторами. Имеется возможность динамически изменять связи между нейронами и коммутаторами, без необходимости повторного синтеза всей нейронной сети.
2. Избыточные нейроны и коммутаторы обеспечивают расширение функций нейросетевой модели.
3. При обнаружении отказов в нейросетевую мо-

дель добавляют дополнительные тесты для проверки новой исправленной версии программных средств.

4. Модель строится методом последовательного синтеза из отдельных обученных фрагментов. Новые фрагменты подсоединяются к модели с помощью дополнительных коммутаторов.

Нейросетевые модели позволяют сохранять и наследовать результаты тестов разных версий программных средств. Применение коммутаторных нейронных сетей позволяет многократно копировать и тиражировать фрагменты ИНС.

Нейросетевая модель позволяет моделировать разные тесты на одном аппаратно-программном комплексе коммутаторов и нейронов. Нейросетевые модели позволяют сократить время выполнения тестов и снизить затраты на разработку программных средств АСУ [8–10].

Выводы

Цель исследования – сокращение затрат на разработку программных средств АСУ в машиностроении. Поставленная цель достигается путем разработки нейросетевых моделей для автоматизации тестирования программных средств. Предложены нейросетевые модели на основе методов искусственного интеллекта. Нейросетевые модели используют коммутаторные нейронные сети, которые создаются методом последовательного синтеза из обученных фрагментов. Коммутаторная архитектура ИНС позволяет расширять и дополнять наборы тестовых данных. Через дополнительные коммутаторы подключают новые фрагменты нейронной сети, которые расширяют и изменяют функции модели.

Применение нейросетевых моделей позволяет реализовать разные тесты на одном аппаратно-программном комплексе. Нейросетевые модели позволяют автоматизировать тестирование и сократить время разработки программных средств.

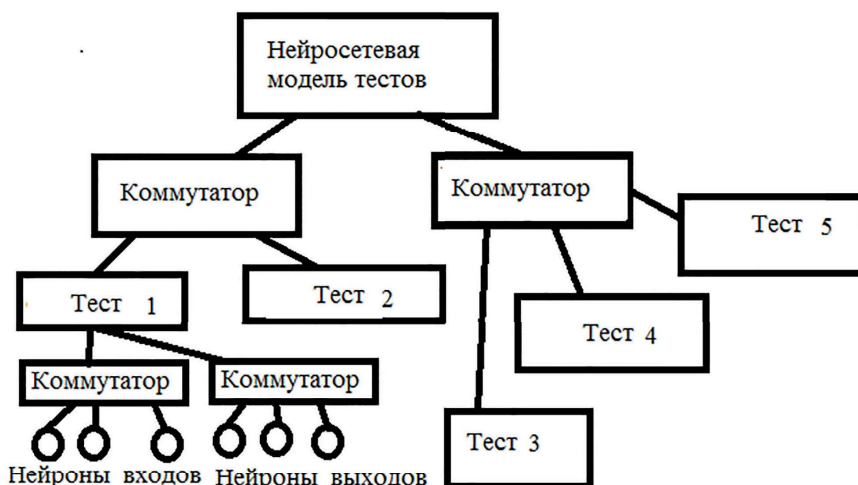


Рис. 1. Коммутаторная структура нейросетевой модели тестирования

Библиографический список

1. Гленфорд Майерс, Том Баджетт, Кори Сандлер Искусство тестирования программ, 3-е издание. The Art of Software Testing, 3rd Edition. — М.: «Диалектика», 2012. — 272 с.
2. Джефф Рэшка, Элфрид Дастин, Джон Пол Тестирование программного обеспечения. — М.: Лори, 2012 г. — 568 с.
3. Лайза Криппин, Джанет Грегори Гибкое тестирование: практическое руководство для тестировщиков ПО и гибких команд. Agile Testing: A Practical Guide for Testers and Agile Teams. — М.: «Вильямс», 2010. — 464 с.
4. Патент на полезную модель 66831 Российская Федерация МПК 7 G06G7/66 Нейронная сеть [Текст] / Кабак И.С., Суханова Н.В.: заявитель и патентообладатель Кабак И.С., Суханова Н.В. № 2007111998 / 22 заявл. 02.04.2007, опубл. 27.09.2007, Бюл № 27, — 2 с., ил.
5. Патент на полезную модель 72084 Российская Федерация МПК 7 G06G7/60, G06G7/62, G06G7/66 Доменная нейронная сеть [Текст] / Кабак И.С., Суханова Н.В.: заявитель и патентообладатель Кабак И.С., Суханова Н.В. № 2007144359/22 заявл. 03.12.2007, опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9,— 2 с., ил.
6. Суханова Н.В. Обеспечение отказоустойчивости аппаратных средств автоматизированных систем управления [Текст] / Н.В. Суханова. — Вестник МГТУ СТАНКИН, 2017, № 2 (41). — с. 79—83.
7. Суханова Н.В. Применение коммутаторной структуры при обеспечении отказоустойчивости аппаратных средств вычислительных систем [Текст] / Н.В. Суханова. — Вестник МГТУ СТАНКИН.— 2017.— № 3 (42). — с. 105—110.
8. Суханова Н.В. Разработка требований к аппаратно-программному комплексу интеллектуальных систем управления в машиностроении [Текст] // Н.В. Суханова. — Научные технологии в машиностроении.— 2018. — № 12 (90). — С. 38—44.
9. Суханова Н.В. Совершенствование структуры интеллектуальных автоматизированных систем управления на базе технологий стратегического, конкурентного и ситуационного управления [Текст] / Н.В. Суханова. — Научные технологии в машиностроении. — 2019. — № 5 (95). — С. 42—48.
10. Суханова Н.В. Проблемы обеспечения качества в интеллектуальных автоматизированных системах управления [Текст] / Н.В. Суханова. — Качество. Инновации. Образование. — 2018. — № 7 (158). С. 42—49.

Суханова Наталия Вячеславовна — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

n_v_sukhanova@mail.ru

Шептунов Сергей Александрович — д-р техн. наук, директор ФГАУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН)

ship@ikti.ru

Sukhanova Natalya V. — candidate Sc. of Engineering, associate professor, lecture of the sub-department of “Computer control systems” of MSUT «STANKIN»

n_v_sukhanova@mail.ru

Sheptunov Sergey A. — PhD, director of Institute for Design and Technological Informatics RAS (IDTI RAS)

ship@ikti.ru

ОТБОР УЧАСТНИКОВ В СОСТАВ ЭКСПЕРТНЫХ ГРУПП С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

SELECTION OF PARTICIPANTS OF EXPERT GROUPS USING THE METHOD OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION

Изложен способ отбора кандидатов в состав экспертных групп с помощью фронта Парето. Также разработан алгоритм для отбора кандидатов. Демонстрация работы алгоритма осуществляется на синтетических данных.

The article describes a method for selecting candidates of expert groups using the Pareto front. An algorithm for the selection of candidates has also been developed. Demonstration of the algorithm is carried out on synthetic data.

Ключевые слова: эксперт, отбор экспертов, алгоритм, фронт Парето, автоматизация.

Keywords: expert, selection of experts, algorithm, Pareto front, automation.

Введение

Процесс отбора кандидатов в состав экспертных групп затрудняется из-за критериев оценки кандидатов. Достаточно сложно сравнить между собой такие критерии как опыт работы и уровень образования. Таким образом, для того, чтобы иметь объективный механизм оценки, важно выбрать способ, с помощью которого можно избежать подобных сравнений. Одним из таких способов является метод многокритериальной оптимизации. Данный метод позволяет осуществлять поиск наилучшего (оптимального) решения, удовлетворяющего нескольким не сводимым друг к другу критериям. Целью многокритериальной оптимизации является моделирование выбора, т.е. оценка качества различных вариантов и выявление предпочтений между ними на основе их алгоритмической обработки [1].

В этой статье предлагается рассмотреть использование фронта Парето для многокритериальной оптимизации процесса отбора экспертов.

1. Факторы, влияющие на выбор эксперта

Существует огромное количество методов отбора экспертов: документальный, экспериментальный, взаимная оценка и самооценка степени компетентности и объективности. Ни один из этих методов не даёт 100 % гарантии, что выбранное решение будет верным [2, 3].

Далее представлены критерии, с помощью которых будет производиться оценка экспертов. Большинство данных для оценки можно получить из отдела кадров, используя документальный способ отбора экспертов. Критерии, применяемые для

отбора экспертов, предоставляют возможность подобрать специалиста, компетентно разбирающегося в данной предметной области. В нашем случае — это работа технологического оборудования, применяемого для операций обработки отверстий без предварительной разметки (далее кондуктора).

Разделим критерии на 2 группы, как представлено на рисунке 1.

Для оценки выбора оптимальных кандидатов по представленным критериям будем использовать фронт Парето. Данный инструмент используется при многокритериальной оптимизации для выбора оптимальных решений. Его использование позволит избавиться от необходимости калибровать данные и приводить их к одному масштабу, т.е. позволяет нам использовать данные, полученные документальным способом, без предварительной обработки.

Кроме того, отсутствует критерий, указывающий на образование эксперта. Данный параметр имеет взаимосвязь с индексом Хирша, следовательно, его применение не обязательно. Индекс Хирша I_h , определяемый в системе Российского индекса научного цитирования, следующим образом характеризует научную активность ученого:

- I_h от 0 до 2 соответствует научной активности начинающего ученого (соискателя ученой степени, аспиранта);
- I_h от 3 до 6 соответствует научной активности кандидата наук;
- I_h от 7 до 10 соответствует научной активности доктора наук;
- I_h от 11 до 15 соответствует научной активностью

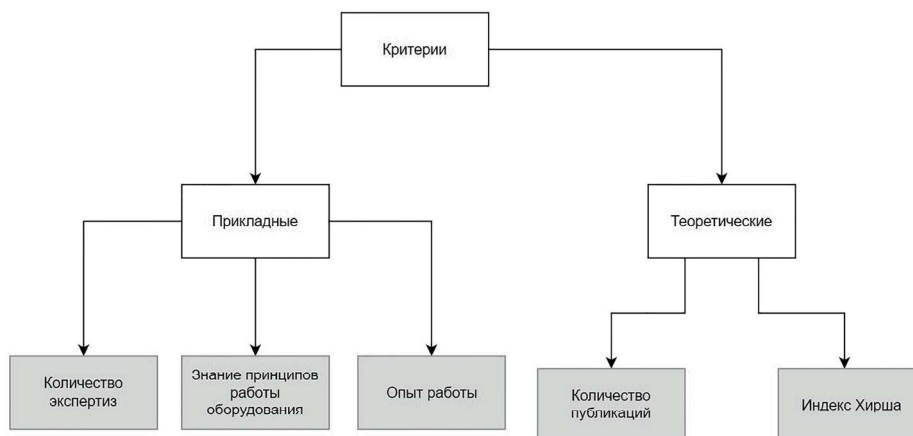


Рис. 1. Разделение критериев по категориям

сти известного ученого (например, члена диссертационного совета, основателя научной школы);

– И_h от 16 и выше – соответствует научной активности ученого с мировым именем (например, руководителя научной организации, председателя диссертационного совета) [4].

Кроме критериев, обозначенных на рисунке 1, существует еще самый важный критерий – это наличие желания у эксперта участвовать в том или ином проекте. Это представлено булевым типом данных, т.е. ответом кандидата на вопрос «Да» или «Нет» (True, False). Если ответ кандидата «Нет», то данный специалист не будет принимать дальнейшее участие в отборе.

2. Описание работы алгоритма

Для прототипа в качестве базы данных будет использоваться объект DataFrame из библиотеки Python «Pandas». Данная библиотека позволяет обрабатывать и анализировать подобные данные. Сгенерируем синтетические данные случайным образом для демон-

страции работы алгоритма. Предполагается, что выборка будет состоять из 10000 кандидатов.

Получаем следующие случайно сгенерированные данные по нашим критериям (рис. 2.)

Далее происходит отбор кандидатов по наличию желания, а также определяется функция, которая определяет элементы выборки, относящиеся к фронту Парето, в соответствии с алгоритмом, программная реализация которого представлена на рис. 3.

На следующем этапе происходит отбор по теоретическим критериям: количество публикаций и индекс Хирша (рис. 4).

На рисунке 5 изображена диаграмма рассеяния элементов выборки с выделенными первым и вторым фронтами Парето. Количество фронтов можно менять в зависимости от требуемого числа кандидатов.

Кандидаты, попавшие в первый и второй фронт Парето, являются наиболее подходящими для участия в дальнейшем отборе. Список этих кандидатов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Список кандидатов после первого этапа отбора

	Желание кандидата	Знание принципов работы сверлильного оборудования	Опыт работы	Количество публикаций	Индекс Хирша	Количество проведенных экспертиз
42	ИСТИНА	3	10	53	32	10
78	ИСТИНА	3	0	149	24	11
98	ИСТИНА	3	10	72	37	11
181	ИСТИНА	3	6	225	17	2
449	ИСТИНА	2	15	59	39	1
465	ИСТИНА	2	0	11	41	15
483	ИСТИНА	3	7	204	27	9
489	ИСТИНА	3	17	150	18	18
493	ИСТИНА	2	1	304	21	8
553	ИСТИНА	2	23	46	42	17
622	ИСТИНА	1	10	19	60	22
657	ИСТИНА	2	4	242	1	1
874	ИСТИНА	2	7	33	45	5
893	ИСТИНА	2	8	118	27	6

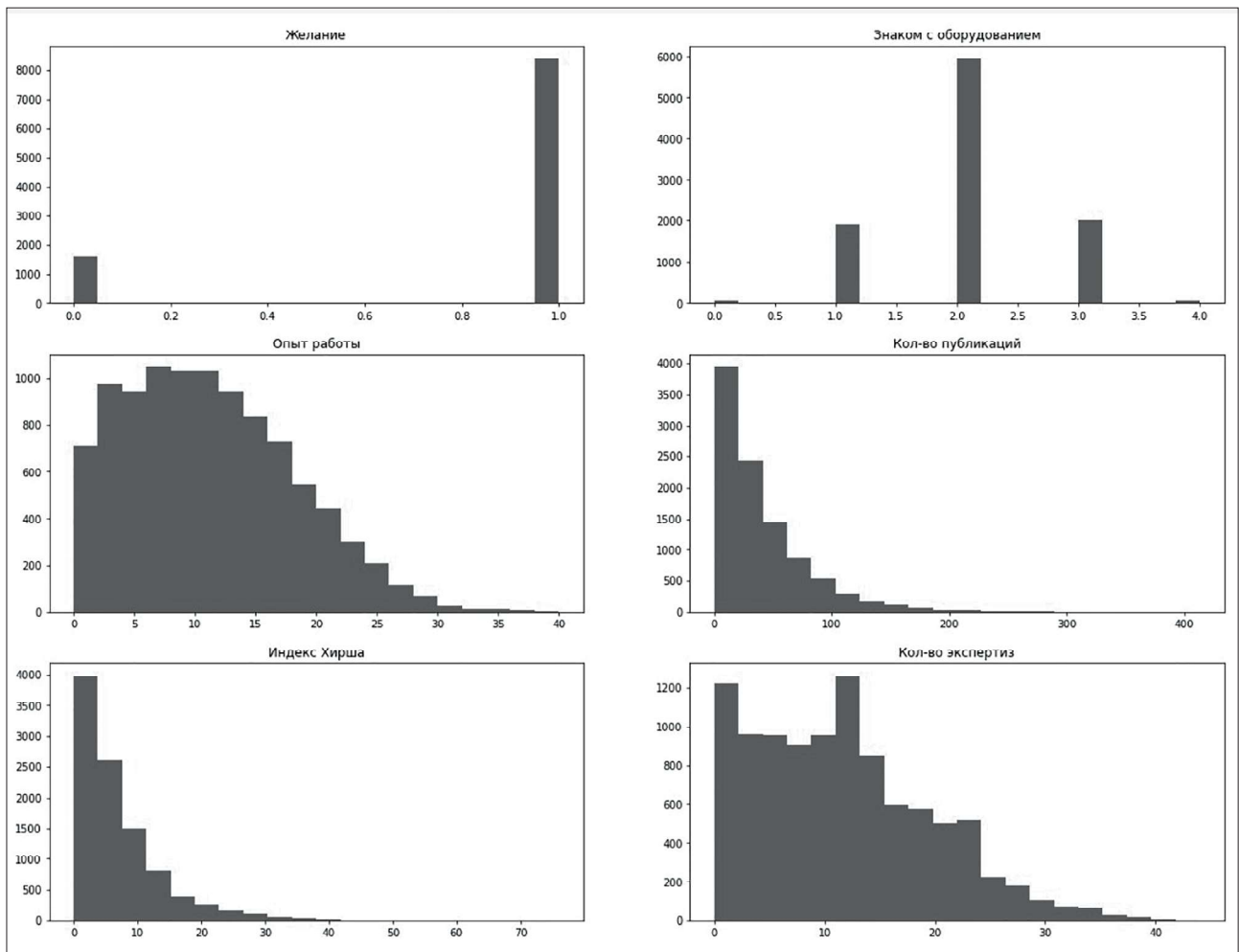


Рис. 2. Случайно сгенерированные данные

```
def is_pareto_efficient_simple(costs, mask=None):
    """
    Find the pareto-efficient points
    :param costs: An (n_points, n_costs) array
    :return: A (n_points, ) boolean array, indicating whether each point i
    is Pareto efficient
    """
    is_efficient = np.ones(costs.shape[0], dtype = bool)

    if type(mask) == np.ndarray or type(mask) == list:
        mask = np.invert(mask)
    else:
        mask = is_efficient.copy()

    for i, c in enumerate(costs):
        if is_efficient[i]:
            if mask[i]:
                is_efficient[is_efficient] = np.any(costs[is_efficient]>c, axis=1) # Keep any point with a lower cost
                is_efficient[i] = True # And keep self
            else:
                is_efficient[i] = False
    return is_efficient
```

Рис. 3. Алгоритм отбора кандидатов по наличию желания


```
columns = ['papers', 'hirsch']

dfi = df.copy()

x = dfi[columns].to_numpy()
n_layers = 2
mask = np.zeros(x.shape[0], dtype=bool)
points = []
for l in range(n_layers):
    m = is_pareto_efficient_simple(x, mask)
    mask += m
    points.append(x[m])

plt.scatter(dfi.papers, dfi.hirsch)

for i in range(n_layers):
    label = f'{i+1}-й фронт Парето'
    plt.scatter(points[i][:,0], points[i][:,1], label=label)
plt.xlabel('Количество публикаций')
plt.ylabel('Индекс Хирша')
plt.legend()
plt.xlim(0,)
plt.ylim(0,)
plt.show()

df_theor = dfi[mask]
df_theor
```

Рис. 4. Алгоритм отбора кандидатов по количеству публикаций и индексу Хирша

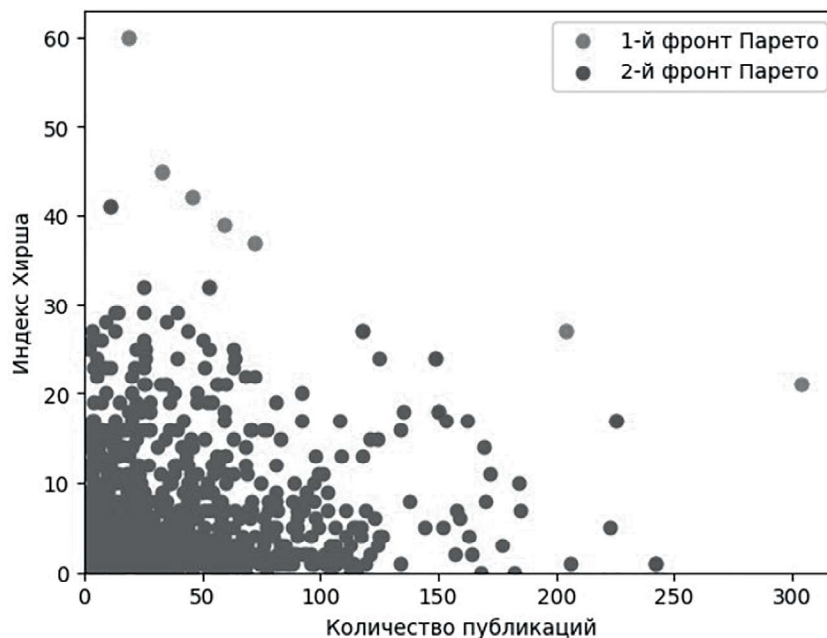


Рис.5. Диаграмма рассеяния элементов выборки

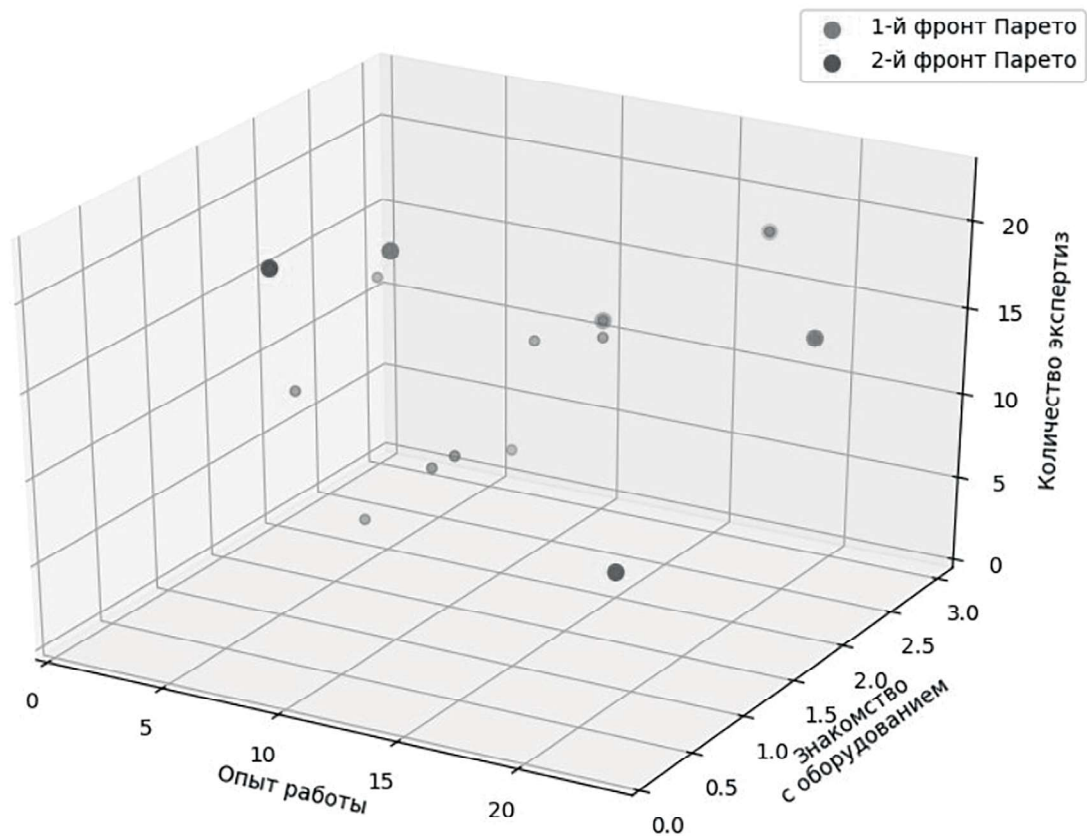


Рис. 6. Второй этап отбора кандидатов

Таблица 2. Итоговый список кандидатов

	Желание кандидата	Знание принципов работы сверлильного оборудования	Опыт работы	Количество публикаций	Индекс Хирша	Количество проведенных экспертиз
98	ИСТИНА	3	10	72	37	11
449	ИСТИНА	2	15	59	39	1
465	ИСТИНА	2	0	11	41	15
489	ИСТИНА	3	17	150	18	18
553	ИСТИНА	2	23	46	42	17
622	ИСТИНА	1	10	19	60	22

На следующем этапе кандидаты, указанные в таблице 1, проходят отбор по прикладным критериям: опыт работы, знание принципов работы сверлильного оборудования и количество проведенных экспертиз. В результате получаем фронт Парето с кандидатами, прошедшими отбор по всем критериям (рис. 6). Список кандидатов представлен в таблице 2.

Заключение

Программная реализация предложенного алгоритма показала свою работоспособность на искусственно генерируемых данных. Данная программа ускоряет подбор кандидатов, но полностью этот процесс не автоматизирует, т. к. окончательное решение принимает человек.

Библиографический список

1. **Хабарова, Д.С.** Обзор программных комплексов многокритериальной оптимизации / Д.С. Хабарова // Прикладная информатика. — 2013. — № 2 (44). — С. 102–112.]
2. **Хвастунов Р.М., Феофанов А.Н., Корнева В.М.,** Нахапетян Е.Г. Квалиметрия в машиностроении. Серия: Учебник для вузов / М.: Издательство «Экзамен», 2009. — 288 с.
3. **Хвастунов Р.М., Негримовская Н.П., Феофанов А.Н.** Способы отбора специалистов в состав экспертных групп [Текст] // Технология машиностроения. — 2008. — № 10. — С. 58–67. — ISSN 1562-322X
4. Арутюнов В.В. Об актуализации и повышении персональных индексов цитирования [Текст] // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. — 2018. — С. 17–20.

Феофанов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф. кафедры инженерная графика
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
feofanov.fan1@yandex.ru

Бушева Анна Геннадьевна — аспирант, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
zub97@mail.ru

Feofanov Alexander Nikolaevich — doctor of technical sciences, prof., Prof. Department of Engineering Graphics
MSUT «STANKIN»
feofanov.fan1@yandex.ru

Busheva Anna Gennadijevna — postgraduate student, Department of Automated Information Processing and Control Systems, MSUT «STANKIN»
zub97@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.951.7.025.7:661.65

С.А. Сингеев, В.И. Ваулин
S.A. Singeev, V.I. Vaulin

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕЙ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КОМПОЗИТА 01

THE STUDY OF THE AVERAGE CONTACT TEMPERATURE OF CUT WHEN REAMING THE HOLES WITH A TOOL OF THE COMPOSITE 01

В статье приводятся результаты исследования температуры резания при развертывании отверстий из композита 01. Исследование температуры необходимо для изучения коэффициента трения и общей характеристики тепловой ситуации на поверхностях контакта инструмента с заготовкой и стружкой. Приведены результаты исследования температуры резания с использованием высокопроизводительного и износостойкого металлорежущего инструмента. К числу наиболее трудоемких операций механической обработки деталей с твердостью HRC > 55 относится развертывание точных отверстий инструментом из композита 01. Измерение температуры производилось методом искусственной термопары на специально сконструированной установке, состоящей из двухкомпонентного тензометрического динамометра для измерения составляющих усилий резания, искусственной термопары, усилителя и осциллографа. На основе исследования получена зависимость температуры резания в виде уравнения степенного вида для расчета температуры резания при развертывании стали ШХ15 (HRC 62-65) инструментом из композита 01 от элементов режима резания. Утверждается, что полученная зависимость может быть использована на практике для расчета температуры резания с целью прогнозирования деформационного упрочнения, остаточных напряжений и структурных превращений в поверхностном слое после обработки, а также для оптимизации режима резания.

The article presents the results of a study of the cutting temperature when deploying holes from composite 01. The study of temperature is necessary to study the coefficient of friction and the general characteristics of the thermal situation on the contact surfaces of the tool with the workpiece and chips. The results of the study of the cutting temperature using high-performance and wear-resistant metal-cutting tools are shown. Among the most labor-intensive machining operations of parts with a hardness of HRC > 55 is the deployment of precise holes with a tool made of composite 01. The temperature was measured by an artificial thermocouple on a specially designed installation consisting of a two-component strain gauge dynamometer for measuring the components of the cutting forces, an artificial thermocouple, an amplifier and an oscilloscope. Based on the study of the dependence of cutting temperature in equation of power type, to calculate cutting temperatures when you deploy SHKH15 steel (HRC 62 to 65) tool composite 01 from the elements of regime cutting. It is stated that the obtained dependence can be used in practice to calculate the cutting temperature in order to predict the deformation hardening, residual stresses and structural transformations in the surface layer after processing, as well as to optimize the cutting mode.

Ключевые слова: исследование температуры резания методом искусственной термопары, установка для измерения температуры резания, развертки с лезвиями композита 01, оптимальные геометрические параметры, полный факторный эксперимент, матрица планирования экспериментов, зависимость для расчета температуры резания.

Keywords: research of cutting temperature by artificial thermocouple method, installation for measuring the cutting temperature, sweep with composite blades 01, optimal geometric parameters, full factorial experiment, the planning matrix of the experiments, dependence for the calculation of the cutting temperature.

Введение

Одним из резервов в повышении технико-экономического уровня и качества машин является применение деталей из износостойких и высокотвердых материалов. Однако обработка деталей из этих материалов на производстве представляет определенные трудности, обуславливающие низкую производительность и качество обработки. К числу наиболее трудоемких операций механической обработки деталей с твердостью HRC > 55 относится обработка точных отверстий. Эффективным методом обработки точных отверстий является развертывание отверстий инструментом из композита 01 взамен растачивания и шлифования [1].

Основная часть

В результате анализа литературных источников установлено следующее. В работе Л.Г. Марковой [2] проводилось исследование средней контактной температуры методом искусственной термопары при замыкании константанового проводника со стружкой в момент перерезания его резцом. В результате исследования установлено, что при точении закаленной стали ХВГ (HRC 58–62) наибольшее влияние на температуру оказывает скорость, а наименьшее — глубина резания. На температуру существенное влияние оказывает износ резца. С затуплением резца до $h_3 = 0,1$ мм температура сначала резко возрастает, затем стабилизируется, достигнув примерно 750°C , при $h_3 = 0,7$ мм начинается интенсивный рост температуры.

Б.Н. Леонов [3] проводил измерение температуры средних участков стружки бесконтактным методом с помощью разработанного им фотоэлектрического прибора, который позволял при диаметре визируемой площадки от 0,25 до 0,5 мм измерять температуру от $300\text{--}350^\circ\text{C}$ и выше. Автор сделал вывод о том, что выбор режимов обработки при точении закаленных сталей необходимо осуществлять таким образом, чтобы температура резания была достаточной для значительного снижения твердости материала в зоне деформации $\theta > 600^\circ\text{C}$ и не превышала теплоустойчивость поликристаллического эльбора-Р. При скорости резания 3,3 м/с при обработке стали ХВГ резцами из эльбора-Р достигалась температура резания не выше 800°C . В интервале изменения скорости резания от 0,4 до 4 м/с, подачи от 0,02 до 0,1 мм/об и глубины резания от 0,1 до 0,3 мм величина температуры примерно соответствовала данным, полученным Л.Г. Марковой.

Г.А. Кулаковым [4] проведено экспериментальное исследование температур в зоне резания закаленной стали ЗОХГСНА резцами из эльбора-Р методом искусственной перерезаемой термопары. Опыты проводились в интервале скоростей резания от 1 до 3 м/с, подачи от 0,02 до 0,12 мм/об и глубины резания от 0,1 до 0,5 мм и фаски износа $h_3 = 0,05$ мм. Для сечения среза $S \times t = 0,04 \times 0,2$ мм температура изменялась в пределах от 440 до 650°C . Кроме этого, автором было

отмечено, что величина износа резца по задней поверхности оказывает весьма значительное влияние на контактную температуру. С ростом фаски износа по задней поверхности от 0,05 до 0,4 мм происходит увеличение температуры на 155°C , а тепловой поток в резец весьма мал — 3–7 %.

Таким образом, все исследования проведены для области температур, не превышающих 800°C при точении резцами из эльбора-Р.

Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю., Фомичев Е.Н. рассматривали особенности процесса лезвийной обработки и преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных деталей инструментом из композита [5].

В.Ч. Хоанг исследовал вопрос эффективности металлообработки резанием. В статье [6] приводится методика экспериментальных исследований и технические средства измерения температуры резания. Делается вывод, что наиболее эффективным методом измерения температуры резания является метод измерения термоЭДС с помощью термопары.

В.В. Глазов и Е.А. Кудряшов в статье [7] провели исследование температуры резания при обработке композиционными материалами. Получены математические зависимости, которые позволяют рассчитать температуру резания при обработке точением прерывистых поверхностей.

В ходе исследования использовались теоретические и эмпирические методы.

К теоретическим методам следует отнести аналитические методы, связанные с анализом полученных результатов исследования. Математические методы позволяют выполнить расчеты и получить новые формулы для расчета средней контактной температуры при развертывании стали инструментом из композита 01 от элементов режима резания. К эмпирическим методам следует отнести: эксперимент, статистические методы систематизации результатов экспериментов.

Измерение температуры производили одновременно с силами резания методом искусственной термопары на специально сконструированной установке [1]. Установка состоит из двухкомпонентного тензометрического динамометра (рис. 1) для измерения составляющих усилий резания, искусственной термопары, усилителя и осциллографа.

На фланце 2 динамометра 1 установлена втулка для крепления с помощью планок 3 обрабатываемого кольца 4 (внутреннее кольцо подшипника № 207). При этом часть боковой стенки втулки обрабатываемого кольца 4 шириной В вырезана. В этом вырезе помещается сборный стержень 5 из того же материала, что и обрабатываемое кольцо. Таким образом, часть обрабатываемого кольца заменена сборным стержнем.

Хромель-алюмелевая термопара устанавливалась в сборный стержень 5 динамометра (рис. 1). Стержень

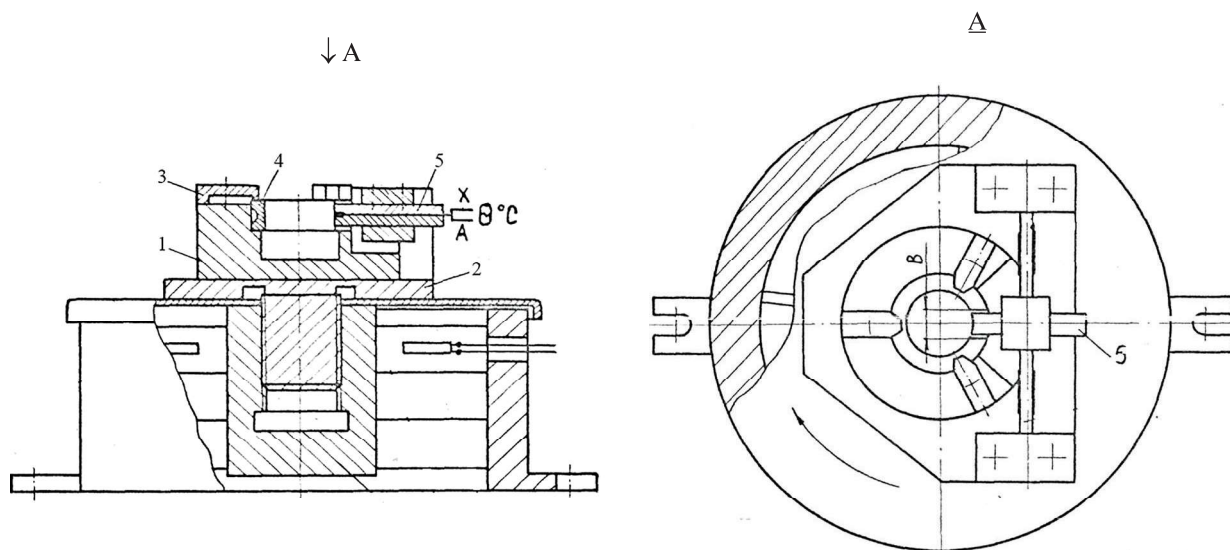


Рис. 1. Установка для измерения температуры резания методом искусственной термопары

(рис. 2) динамометра состоит из пластин 1 и 2, винтов 4 и тонких полос хромеля и алюминия 3. Пластины изготавливались из стали ШХ15 с последующей закалкой до твердости обрабатываемых колец HRC 62–64. Тонкие полосы хромеля и алюминия изготавливались из проволоки диаметром 2 мм прокаткой через вальцы до толщины 0,03 мм, при этом производили неоднократный отжиг для снятия деформационного упрочнения.

При установке полосы изолировались друг от друга и от пластин с помощью клея БФ-2 и кальки. После сборки пластин и полос производился контроль их изоляции.

Таким образом, часть обрабатываемого кольца заменялась стержнем, не касающимся кольца, при этом ширина стержня со встроенной термопарой была

меньше расстояния между режущими кромками соседних лезвий развертки (рис. 2).

Устройство для измерения температуры резания при развертывании (рис. 1) устанавливалось и закреплялось на столе вертикально-сверлильного станка.

После пробной обработки нескольких колец производили тарирование термопары.

В керамическую ванну муфельной печи с алюминиевыми опилками помещался стержень со встроенной термопарой и стандартная хромель-алюмелевая термопара (ТХА) по ГОСТ 6616-94 с известными характеристиками. Тарированная термопара подключалась к осциллографу, а величина ТЭДС контрольной термопары фиксировалась с помощью потенциометра. (В данном случае потенциометр — это измерительный прибор, предназначенный для

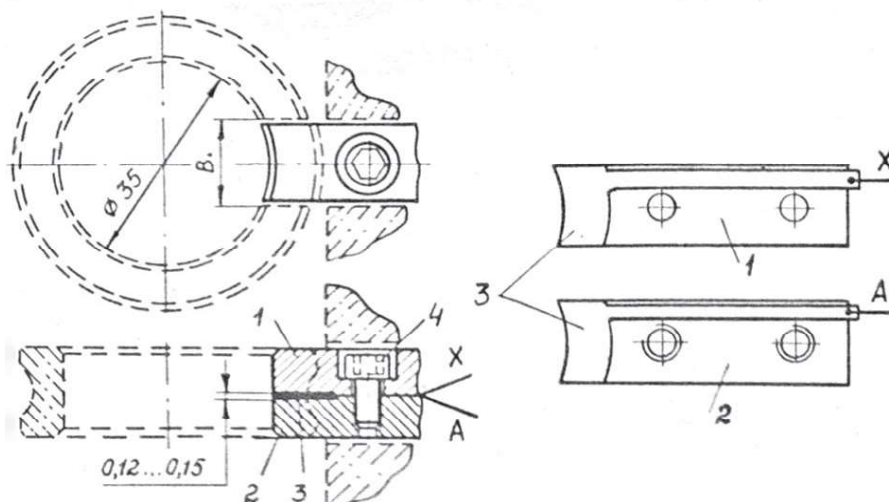


Рис. 2. Устройство стержня с встроенной термопарой

определения напряжения путем сравнения двух, в общем случае, различных напряжений или ЭДС с помощью компенсационного метода). Нагрев термопар производился до 1300°C, и термопары медленно охлаждались в печи до 20°C. Регистрацию значения тока, обусловленного термо-ЭДС, при нагревании и охлаждении производили через каждые 50°C.

Результаты тарирования термопары даны на рис. 3.

Обработку колец производили на станке мод. 2Н135 с применением СОЖ в виде 5 % содового раствора. Обрабатывали отверстия шестизубыми регулируемыми развертками с паянными в рабочую часть инструмента поликристаллами композита 01. Оптимальные геометрические параметры режущих элементов развертки были найдены на основе стойкостных испытаний: угол в плане $\varphi = 35^\circ$; передней угол $\gamma = -20^\circ$, задней угол $\alpha = 15^\circ$; длина калибрующей части $l = 2$ мм; ширина ленточки на калибрующей части $f = 0,3 \dots 0,5$ мм; вспомогательный угол в плане $\varphi = 1^\circ$.

Зависимость температуры резания от исследуемых факторов можно представить уравнением степенного вида

$$\theta = cV^x S_z^y t^z,$$

где V — скорость резания м/с; S_z — подача на зуб, мм.; t — глубина резания, мм; c — постоянная величина.

Данное уравнение после логарифмирования получило вид

$$\ln \theta = \ln c + x \ln V + y \ln S_z + z \ln t.$$

Результаты экспериментов описывали полиномом вида

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3,$$

где y — логарифм температуры резания;

$b_0, b_1 \dots b_{123}$ — параметры полинома;

x_1, x_2, x_3 — логарифмы V, S_z, t .

Принятые в исследовании уровни факторов и их кодовое обозначение указаны в таблице 1.

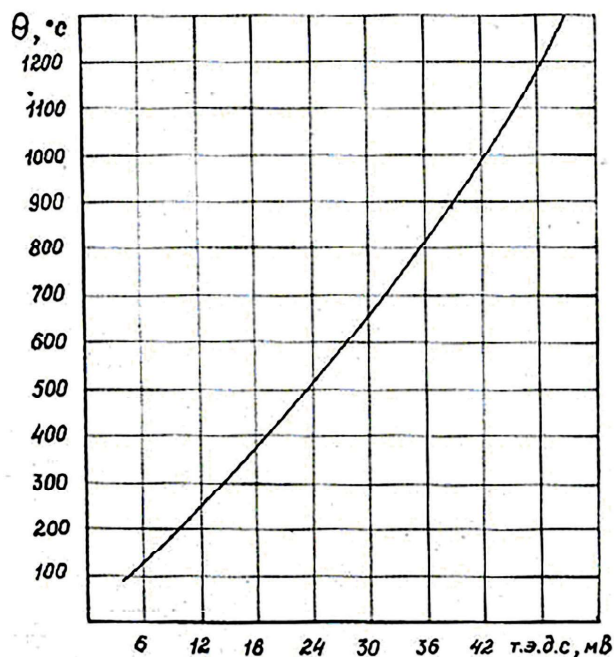


Рис. 3. Результаты тарирования термопары

Преобразование натуральных значений факторов в кодированные производили по формулам [8, 9]:

$$x_1 = \frac{2(\ln V - \ln 3)}{\ln 3 - \ln 1} + 1; \quad x_2 = \frac{2(\ln S_z - \ln 0,1)}{\ln 0,1 - \ln 0,02} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln t - \ln 0,3)}{\ln 0,3 - \ln 0,1} + 1;$$

$$x_1 = 1,82 \ln V - 1; \quad x_2 = 1,25 \ln S_z + 3,88; \quad x_3 = 1,82 \ln t + 3,18.$$

Для определения коэффициентов $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ полинома нами был проведен полный факторный эксперимент типа 2^3 . В таблице 2 представлены матрица планирования экспериментов и результаты опытов [1].

Таблица 1. Уровни факторов и их кодовое обозначение

Факторы	Кодированное обозначение	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным		
		1	0	-1
Скорость резания V , м/с	x_1	3	2	1
Подача на зуб S_z , мм	x_2	0,1	0,06	0,02
Глубина резания t , мм	x_3	0,3	0,2	0,1

Таблица 2. Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$\theta, ^\circ\text{C}$			$\theta_{cp}, ^\circ\text{C}$	$\ln\theta_1$	$\ln\theta_2$	$\ln\theta_3$	$\ln\theta_{cp}$
									θ_1	θ_2	θ_3					
1	+	-	-	-	+	+	+	-	330	325	320	325	5,8	5,78	5,77	5,78
2	+	+	-	-	-	-	+	+	650	615	655	640	6,48	6,42	6,48	6,46
3	+	-	+	-	-	+	-	+	540	555	540	545	6,29	6,32	6,29	6,3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	1070	1040	1040	1050	6,98	6,95	6,95	6,96
5	+	-	-	+	+	-	-	+	410	400	405	405	6,02	5,99	6	6
6	+	+	-	+	-	+	-	-	770	785	790	780	6,65	6,67	6,67	6,66
7	+	-	+	+	-	-	+	-	675	685	680	680	6,51	6,53	6,52	6,52
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1350	1300	1250	1300	7,21	7,17	7,13	7,17

В таблице 2 использованы следующие обозначения:
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – температуры резания проведенных опытов при одинаковых условиях.

$\theta_{cp}, ^\circ\text{C}$ – среднее значение контактной температуры резания в градусах Цельсия.

Опыты выполнялись в случайной последовательности, причем каждый опыт, предусмотренный матрицей планирования, повторяли три раза. Поэтому общее число опытов равно 24, а порядок их выполнения устанавливали по таблице случайных чисел. Номера опытов выше восьмого относятся к повторным, например условия опыта первого и девятого одинаковы и соответствуют условиям первого опыта в матрице планирования и т. д.

Для каждой серии опытов вычисляли среднее арифметическое значение параметра оптимизации y_{cp} и дисперсию воспроизводимости опыта S_y^2 по формуле [8, 9]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n}$$

где S_u^2 – однородность ряда дисперсий, найденных в ходе эксперимента и вычисляемых на основании выражения;

n – число опытов в серии;

u – номер строки матрицы планирования.

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - y_{cp})^2$$

где j и m – соответственно номер и число параллельных опытов;

Однородность ряда дисперсий S_u^2 проверяли по G-критерию Кохрена [8, 9]

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} = \frac{0,001}{0,00355} = 0,28$$

При 5 % уровне значимости для n = 8 (число опытов в серии) и m = 3 в данном случае табличное значение критерия $G_T = 0,52$. Гипотеза однородности дисперсий S_u^2 принимается, поскольку

$$G_p < G_T$$

где G_p – расчетное значение G-критерия Кохрена.

Дисперсию воспроизводимости эксперимента находили из выражения

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} = \frac{0,00355}{8} = 0,00044$$

Расчет коэффициентов уравнения регрессии, их значимости и проверка адекватности полученной модели здесь не приведены.

После расчета и подстановки значений коэффициентов уравнение приняло вид

$$y = 6,48 + 0,33x_1 + 0,255x_2 + 0,11x_3 - 0,0025x_{12} + 0,0025x_3 + 0,0025x_{231}$$

Коэффициенты b_{12}, b_{13} и b_{123} (в формуле приведены в числовых значениях) по абсолютной величине меньше доверительного интервала, поэтому их можно считать статистически незначимыми и исключить из полученного уравнения. После этого уравнение приняло вид

$$y = 6,48 + 0,33x_1 + 0,255x_2 + 0,11x_3 \tag{1}$$

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным в уравнение (1) подставляем значения факторов x_1, x_2, x_3

$$\ln \theta = 6,48 + 0,33(1,82 \ln V - 1) + 0,255(1,25 \ln S_z + 3,88) + 0,11(1,82 \ln t + 3,18); \tag{2}$$

$$\ln \theta = 7,49 + 0,6 \ln V + 0,32 \ln S_z + 0,2 \ln t$$

Потенцируя полученное выражение (2), получили зависимость (3) для расчета средней контактной температуры при развертывании стали ШХ15 (HRC 62–65) инструментом из композита 01 от элементов режима резания V , S_z , t

$$\theta = 1800V^{0.6}S_z^{0.32}t^{0.2} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где V – скорость резания м/с; S_z – подача на зуб, мм.; t – глубина резания, мм.

Полученная зависимость (3) средней контактной температуры может быть использована на практике для расчета температуры с целью прогнозирования деформационного упрочнения, остаточных напряжений и структурных превращений в поверхностном слое после обработки, а также для оптимизации режима резания. Значения диапазонов значений переменных, входящих в формулу (3), приведены в таблице 1.

Заключение

В ходе исследования мы получили зависимость для расчета средней контактной температуры при развертывании стали ШХ15 (HRC 62–65) инструментом из композита 01 от элементов режима резания.

Полученная зависимость справедлива для практических значений режимов резания при развертывании отверстий в закаленных до высокой твердости сталей: скорости резания $V = 1...3$ м/с, подачи на зуб $S = 0,02...0,1$ мм, $t = 0,1...0,3$ мм.

Наибольшее влияние на температуру резания оказывает скорость резания V , а наименьшее влияние – подача S и глубина резания t .

Установлено, что при оптимальных режимах резания на поверхности контакта стружки с инструментом возникает температура в пределах 800–1300°C, что ниже температуры плавления обрабатываемого материала и допустимой температуры инструментального материала. При этих условиях образование нароста не наблюдается.

Библиографический список

1. Сингеев С.А. Исследование процесса развертывания точных отверстий инструментом из СТМ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. – 196 с.
2. Маркова Л.Г. Исследование процесса тонкого точения закаленных сталей резцами из эльбора-Р: Дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1971. – 149 с.
3. Леонов Б.И. Исследование термодетонационных явлений в процессе тонкого точения металлов резцами из твердого сплава и эльбора-Р: Дис. ... канд. техн. наук / КПТИ. – Куйбышев, 1973. – 172 с.
4. Кулаков Г.А. Исследование технологических и физических особенностей тонкого точения закаленных сталей резцами из эльбора-Р: Дис. ... канд. техн. наук / КПТИ. – Куйбышев, 1974. – 271 с.
5. Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю., Фомичев Е.Н. Особенности процесса лезвийной обработки конструктивно сложных деталей // Современные технологии (системный анализ, моделирование). – Иркутск: Ир ГУПС, 2010. № 2(26). – С. 121–124
6. Хоанг В.Ч. Практические вопросы исследования температуры резания при точении // Известие ТулГУ. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2015. вып. 7. Ч.1. – С. 78–83
7. Глазов В.В., Кудряшов Е.А. К вопросу определения температуры резания композиционными материалами // Современные технологии в машиностроении: Темат. сборник науч. докл. – Пенза: Пензенский гос. ун-т, Приволжский дом знаний, 1999. – С. 68–70.
8. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
9. Кокарев В.И. Применение статистических методов планирования эксперимента по идентификации процесса эксплуатации режущего инструмента. – М.: КРУК, 2013. – 53 с.

Сингеев Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в г. Сызрани
singeev_sergey@mail.ru

Ваулин Владимир Иванович – канд. пед. наук, доцент кафедры «Инженерные дисциплины», филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в г. Сызрани
vaul.vladimir2014@yandex.ru

Singeev Sergey Aleksandrovich – associate Professor of the Department «Engineering disciplines», branch of the «Samara state technical University» in Syzran, the candidate of technical Sciences
singeev_sergey@mail.ru

Vaulin Vladimir Ivanovich – the candidate of pedagogical Sciences, associate Professor of the Department «Engineering disciplines», branch of the «Samara state technical University» in Syzran
vaul.vladimir2014@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ШЛИЦЕВОГО ВАЛА С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATHCAD

MATHEMATICAL MODELING OF THE SPLINE SHAFT PROFILE USING MATHEMATICAL PROGRAMMING TOOLS IN THE MATHCAD ENVIRONMENT

В данной статье приведен полный алгоритм, позволяющий сформировать параметризованную математическую модель профиля шлицевого вала в торцевом сечении как совокупность заданного количества дискретных точек. Данная модель может быть применена как модуль формирования исходных данных для решения прямой задачи профилирования червячно-шлицевых фрез численным методом.

This article provides a complete algorithm that allows you to form a parameterized mathematical model of the profile of a splined shaft in the end section, as a set of a given number of discrete points. This model can be used as a module for generating initial data for solving the direct problem of profiling worm-spline cutters by the numerical method.

Ключевые слова: режущий инструмент, поверхность, математическая модель, алгоритм, шлицевой вал.

Keywords: cutting tool, surface, mathematical model, algorithm, splined shaft.

Современное направление развития подходов к проектированию режущих инструментов связано с созданием систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих с помощью современных вычислительных систем комплексно решать вопросы, возникающие на всех этапах проектирования и изготовления инструментов.

Однако при разработке САПР режущих инструментов, работающих по методу обкатки, требуется модуль формирования исходной поверхности. Это связано с необходимостью решения задачи профилирования [1–3].

В данной статье приведен полный алгоритм, позволяющий сформировать параметризованную математическую модель профиля шлицевого вала как массива заданного количества дискретных точек [5].

Исходными данными для модели являются параметры профиля шлицевого вала: D – внешний диаметр профиля; d – внутренний диаметр профиля; z – число шлицев; B – ширина шлица; r – радиус выкружки.

Профиль шлицевого вала периодичен и состоит из нескольких шлицев. Один прямоугольный шлиц (шаг/период профиля) имеет симметричную форму, что позволяет описать только его половину. Профиль половины шлица (шага/периода) можно разделить на четыре участка (рис. 1): радиусный ab – участок дуги

внутреннего диаметра вала; радиусный bc – радиусный участок переходной кривой в форме выкружки с центром в точке k (при базировании шлица по внутреннему диаметру и боковым сторонам); прямолинейный участок cd (боковая поверхность шлица); радиусный участок de – участок дуги внешнего диаметра вала.

Для построения профиля шлицевого вала, состоящего из упомянутых выше участков, достаточно задать шесть расчетных точек (a, b, c, d, e) по границам этих участков (рис. 1).

X_e и Y_e – координаты вершины шлица e . Из рисунка 1 следует, что $X_b=0$, $Y_b=D/2$;

X_a и Y_a – координаты точки a определяются по формулам (1) и (2).

$$X_a = \frac{-d}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{z}\right) \quad (1)$$

$$Y_a = \frac{d}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{z}\right); \quad (2)$$

X_c и Y_c – координаты точки c определяются по формулам (3) и (4).

$$X_c = \frac{-B}{2} \quad (3)$$

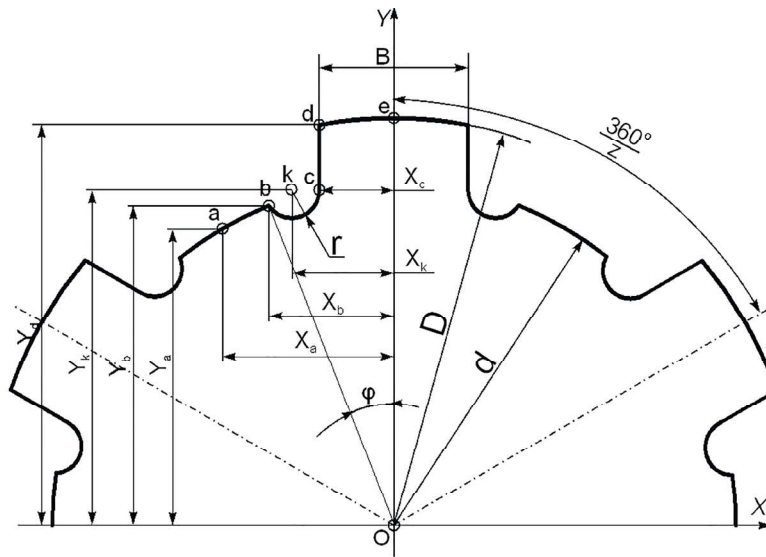


Рис. 1 Форма профиля шлицевого вала и его основные параметры

$$Y_c = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2}; \quad (4)$$

X_d и Y_d – координаты точки d определяются по формулам (5) и (6).

$$X_d = \frac{-B}{2} \quad (5)$$

$$Y_d = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2}; \quad (6)$$

X_k и Y_k – координаты точки k – центра радиусного участка профиля bc. Из рисунка 1 следует, что $X_k = -B/2 - r$, $Y_k = Y_c$.

X_b и Y_b – координаты точки b определяются по формулам (7), однако для вычисления необходимо определить угол ϕ , определяющий положение точки b. Он зависит от ширины шлица B, диаметра и радиуса r (рис. 1).

$$X_b = \frac{-d}{2} \cdot \sin(\phi); Y_b = \frac{-d}{2} \cdot \cos(\phi) \quad (7)$$

Угол ϕ в свою очередь определяется по формуле (8):

$$\phi = 2 \cdot \arccos \left[\frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{X_k^2 + Y_k^2} - r\right)^2}{d \cdot \sqrt{X_k^2 + Y_k^2}} \right] + \arcsin \left(\frac{B}{d} \right) \quad (8)$$

Для построения профиля также немаловажен угол ϕ_1 – угол сектора радиусного участка bc, который, в свою очередь, определяется по формуле (9):

$$\phi_1 = 2 \cdot \arcsin \left[\frac{d}{2 \cdot r} \cdot \sin \left[\arccos \left[\frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{X_k^2 + Y_k^2} - r\right)^2}{d \cdot \sqrt{X_k^2 + Y_k^2}} \right] \right] \right] \quad (9)$$

Следующий этап предполагает интерполяцию участков профиля для получения непрерывного контура. Наиболее удобно для дальнейшего использования описать профиль набором точек с координатами, записанными в линейные массивы X и Y с числом элементов n, что позволит изменять количество точек профиля. Интерполяция производится средствами Mathcad, с помощью элементов математического программирования. На рисунке 2 представлена запись в среде Mathcad в виде алгоритма, который заполняет массив X координатами точек по оси x для симметричного сектора профиля шлицевого вала с углом $360^\circ/z$.

На рисунке 3 представлена запись в среде Mathcad в виде алгоритма, который заполняет массив Y координатами точек по оси y для симметричного сектора профиля шлицевого вала с углом $360^\circ/z$.

На рисунке 4 изображен контур профиля одного сектора шлицевого вала в виде графика в декартовой системе координат. График выполнен в виде совокупности точек с координатами из массивов X и Y.

Вычисленные координаты заданного количества точек на участке профиля уже могут быть использованы как исходные данные для решения прямой задачи профилирования. Однако при необходимости можно получить профиль всего шлицевого вала. Для этого необходимо создать круговой массив вычисленного участка. На рис. 5 приведен алгоритм в среде Mathcad

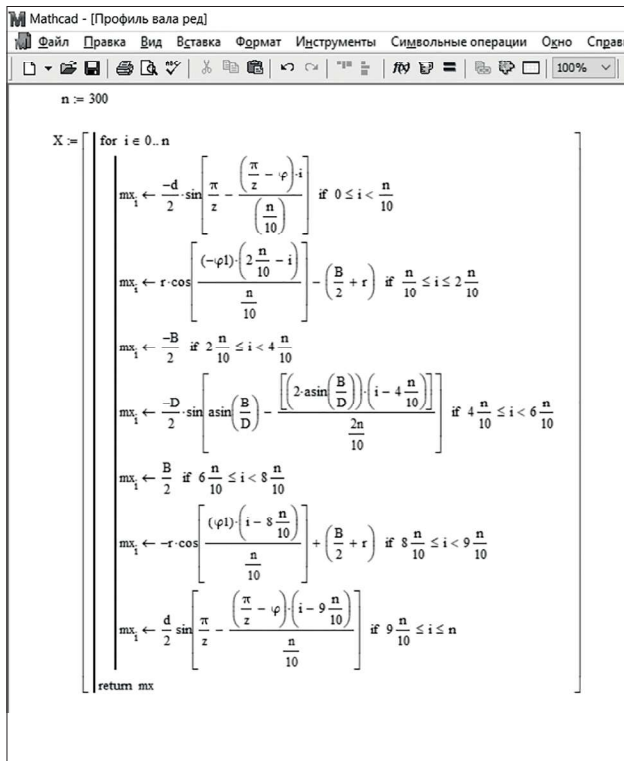


Рис. 2 Запись в среде Mathcad элементов программирования, которые формируют линейный массив с координатами точек профиля по оси x

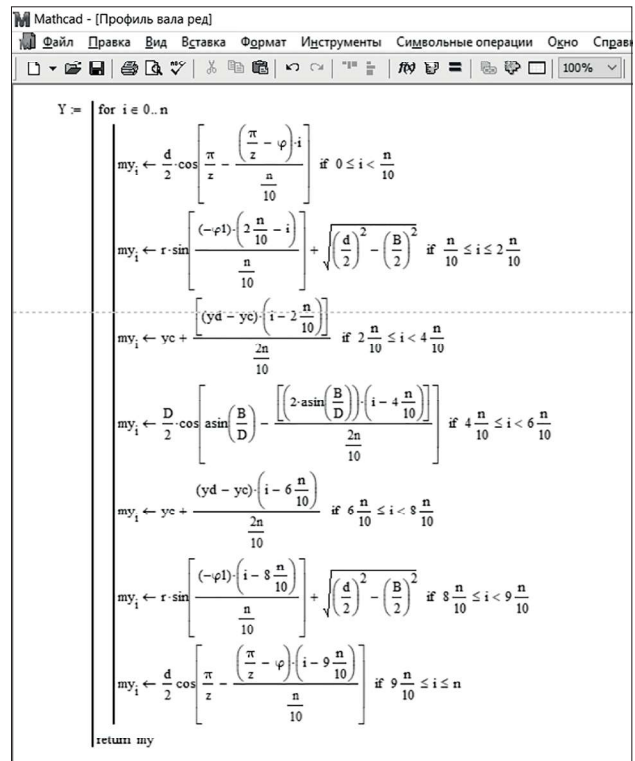


Рис. 3 Запись в среде Mathcad элементов программирования, которые формируют линейный массив с координатами точек профиля по оси y

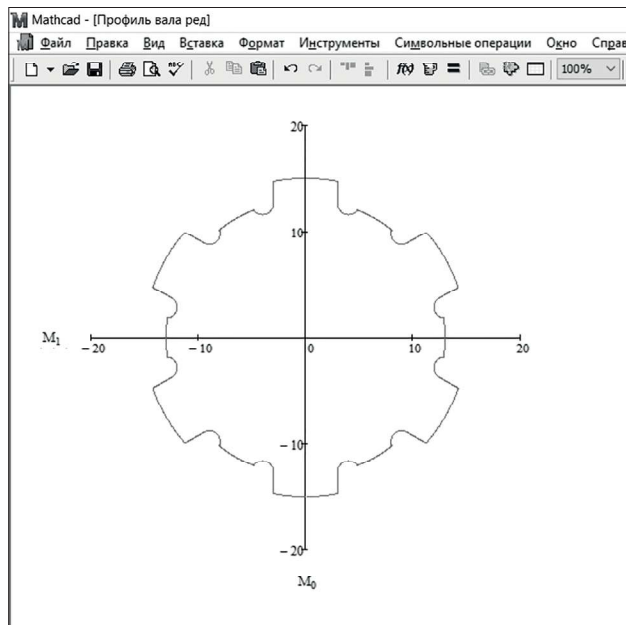
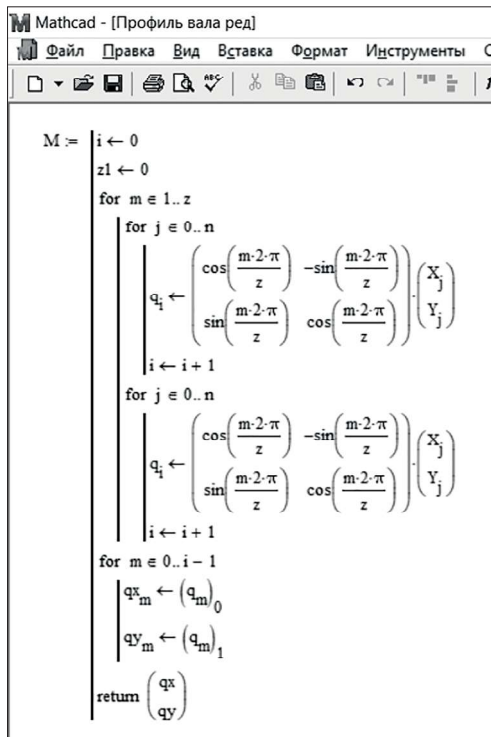


Рис. 5 Алгоритм получения полного профиля шлицевого вала, выполненный в среде Mathcad, и результат моделирования в виде графика

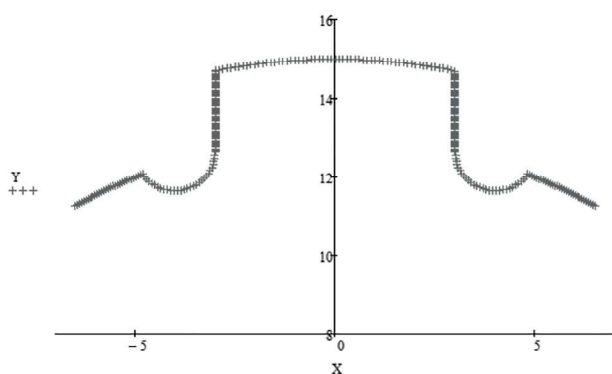


Рис. 4 Результат моделирования сектора профиля шлицевого вала в виде графика в среде Mathcad в виде множества дискретных точек

для формирования полного профиля шлицевого вала в виде массива точек.

Приведенная выше математическая модель позволяет формировать профиль шлицевого вала по заданным параметрам (внешний диаметр, внутренний диаметр, ширина шлица, число шлицев, наличие и размер выкружки). Модель приведена полностью и может быть использована для построения профилей шлицевых валов как стандартной формы, так и специальной. Модель позволяет формировать профили валов с базированием по внешнему диаметру и боковым сторонам и с базированием по внутреннему диаметру и боковым сторонам. Модель может быть реализована различными программными средствами, например, с помощью языков программирования высокого уровня или специализированного программного обеспечения.

Модель может быть использована в качестве модуля вычисления исходных данных в общей модульной системе решения задачи профилирования инструмента второго порядка – дисковой фасонной фрезы или фасонной червячной фрезы [1, 2, 3, 6, 7, 8].

Домнин Пётр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
_domnin@rambler.ru

Domnin Petr Valerevich – docent, candidate Sc of Engineering of sub-department of «Instrumental equipment and shaping technology» of MSUT «STANKIN»
_domnin@rambler.ru

Библиографический список

1. **Yu. E. Petukhov, P. V. Domnin.** Determining worm-mill profiles / Russian Engineering Research – 2020 – Т. 40, С. 283–286.
2. **Petukhov, Y. E., Domnin, P. V.** Numerical shaping method for hobbing tools / Russian Engineering Research – 2020 – Т. 40, С. 76–78.
3. **Domnin P. V.** Nondestructive assessment of the cutting properties of wheels with a single-layer diamond-galvanic coating / Petukhov Y. E., Domnin P. V., Rubets A. A. // Russian Engineering Research. – 2016. – Т. 36. № 4. С. 309–311.
4. **Петухов Ю.Е.** Формообразование численными методами. М., Станкин, 2004 г. – 200 с.
5. **Петухов Ю.Е., Домнин П.В.** / Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 4 (43). С. 100–104.
6. **Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Сяочуан Ч.** / Математическая модель определения профиля червячных фрез // Вестник машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 10–13.
7. **Петухов Ю.Е., Домнин П.В.** Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента / В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. – 2016. С. 86–90.
8. **Домнин П.В., Петухов Ю.Е.** Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности / В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). – 2019. – С. 41–44.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТОМ СТАНДАРТНОГО ПРОФИЛЯ

DETERMINATION OF THE CUTTING PATTERN FOR THE PROCESSING OF SHAPED HELICAL SURFACES WITH A STANDARD PROFILE TOOL

В данной статье приведен алгоритм, позволяющий сформировать параметризованную математическую модель формирования схемы резания для процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля. Приведена графическая схема метода определения толщин срезаемых слоев материала в зависимости от формы исходной поверхности, параметров установки, размера инструмента и заданной подачи на зуб. Рассмотрены две принципиальные схемы установки инструмента для обработки винтовых канавок инструментов.

This article provides an algorithm that allows you to form a parameterized mathematical model of the formation of a cutting pattern for the process of shaping helical surfaces with a standard profile tool. A graphical diagram of the method for determining the thickness of the cut layers of material depending on the shape of the initial surface, installation parameters, tool size and specified feed per tooth is presented. Two schematic diagrams of tool installation for machining helical grooves of tools are considered.

Ключевые слова: формообразование, режущий инструмент, винтовая поверхность, математическая модель, схема резания, срезаемый слой.

Keywords: shaping, cutting tool, helical surface, mathematical model, cutting scheme, cut layer.

Для обработки фасонных поверхностей важными факторами, которые позволяют судить о работоспособности инструмента, являются оценка загруженности участков режущих кромок, величина изменения кинематических углов в процессе обработки, а также схема резания.

На рис. 1 представлена расчетная схема определения размеров срезаемого слоя при фрезеровании винтовой поверхности концевой фрезой прямого профиля. На базе расчетной схемы определения размеров срезаемых слоев была создана математическая и трехмерная параметрическая CAD модели [1, 2, 3], которые позволяют формировать схему резания при формообразовании профиля винтовой канавки инструментом прямого профиля в зависимости от конструкции инструмента, параметров установки и режимов резания. Схема резания представляет собой картину последовательного снятия слоев материала при формировании профиля винтовой поверхности детали (в торцевом сечении) режущими кромками зубьев фрезы в процессе обработки.

При формировании схемы резания торцевое сечение детали рассматривается неподвижным, а

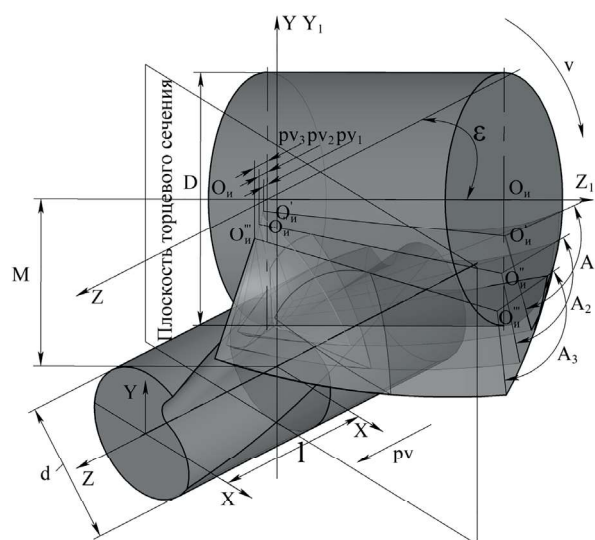


Рис. 1. Определение размеров срезаемого слоя при фрезеровании винтовой поверхности фрезой стандартного профиля

режущая кромка первого зуба инструмента поворачивается вокруг оси инструмента на один зуб. При этом одновременно ось фрезы совершает винтовое движение относительно оси обрабатываемой детали, т. е. перемещается вдоль оси детали на расстояние, равное величине подачи на зуб SZ , и согласованно поворачивается вокруг оси на угол ν (рис. 1).

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма метода построения схемы резания при формообразовании винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля.

В основе алгоритма лежит обращение к подпрограмме MR [1, 2, 4], которая формирует результирующую зависимость (1). Исходные данные для подпрограммы MR представлены в таблице 1.

$$p = \frac{t}{2\pi},$$

где t — шаг винтовой канавки.

Результирующая матрица

$$MR = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(M4 \times \left(M3 \times \left(M2 \times \left(M1 \times \begin{pmatrix} 0 \\ R_i \\ Z_{ui} \\ 1 \end{pmatrix} \right) \right) \right) \right) \quad (1)$$

Матрицы последовательного преобразования систем координат имеют следующий вид:

$$M1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M2 = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(-\varepsilon) & 0 & \sin(-\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & m \\ -\sin(-\varepsilon) & 0 & \cos(-\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M4 = \begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p\nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{где } \nu = \frac{s_z Z}{2\pi p} (\alpha_i - \alpha_{ai}).$$

В таблице 2 приведен ряд результатов моделирования схем резания в среде Mathcad. В таблице приведены станочные параметры установки (α , β , a , b), диаметр инструмента прямого профиля D и величина подачи на зуб, а так же результаты моделирования в виде сформированных схем резания при обработке винтовых фасонных поверхностей стандартным инструментом.

В ходе исследования схемы резания рассматривались две схемы обработки фасонных винтовых канавок инструментом на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности.

Первый вариант (рис. 3) формирования винтовой поверхности реализуется при установке инструмента относительно заготовки таким образом, что цилиндрическая инструментальная поверхность обрабатывает спинку зуба, а вершина зубьев принимает участие в формировании передней поверхности.

Второй вариант (рис. 4) реализуется при установке инструмента относительно заготовки таким образом, что спинку зуба формирует торцевая инструментальная поверхность, а вершины зубьев участвуют в обработке только передней поверхности и дна канавки.

Проведенные исследования схемы резания показали, что при различных сочетаниях станочных

Таблица 1. Исходные данные для формирования численной модели построения схемы резания

Кол-во преобр.	Номер преобразования	Параметр преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (от 1 до F)		
4	1	$(\psi_4=0, \lambda_4=0, \nu_4=\alpha)$	$(m_4=0, l_4=0, q_4=0)$
	2	$(\psi_1=1/p, \lambda_1=0, \nu_1=0)$	$(m_1=0, l_1=0, q_1=0)$
	3	$(\psi_2=\nu, \lambda_2=-\varepsilon, \nu_2=0)$	$(m_2=0, l_2=m, q_2=0)$
	4	$(\psi_3=\nu, \lambda_3=0, \nu_3=0)$	$(m_3=0, l_3=0, q_3=p\nu)$

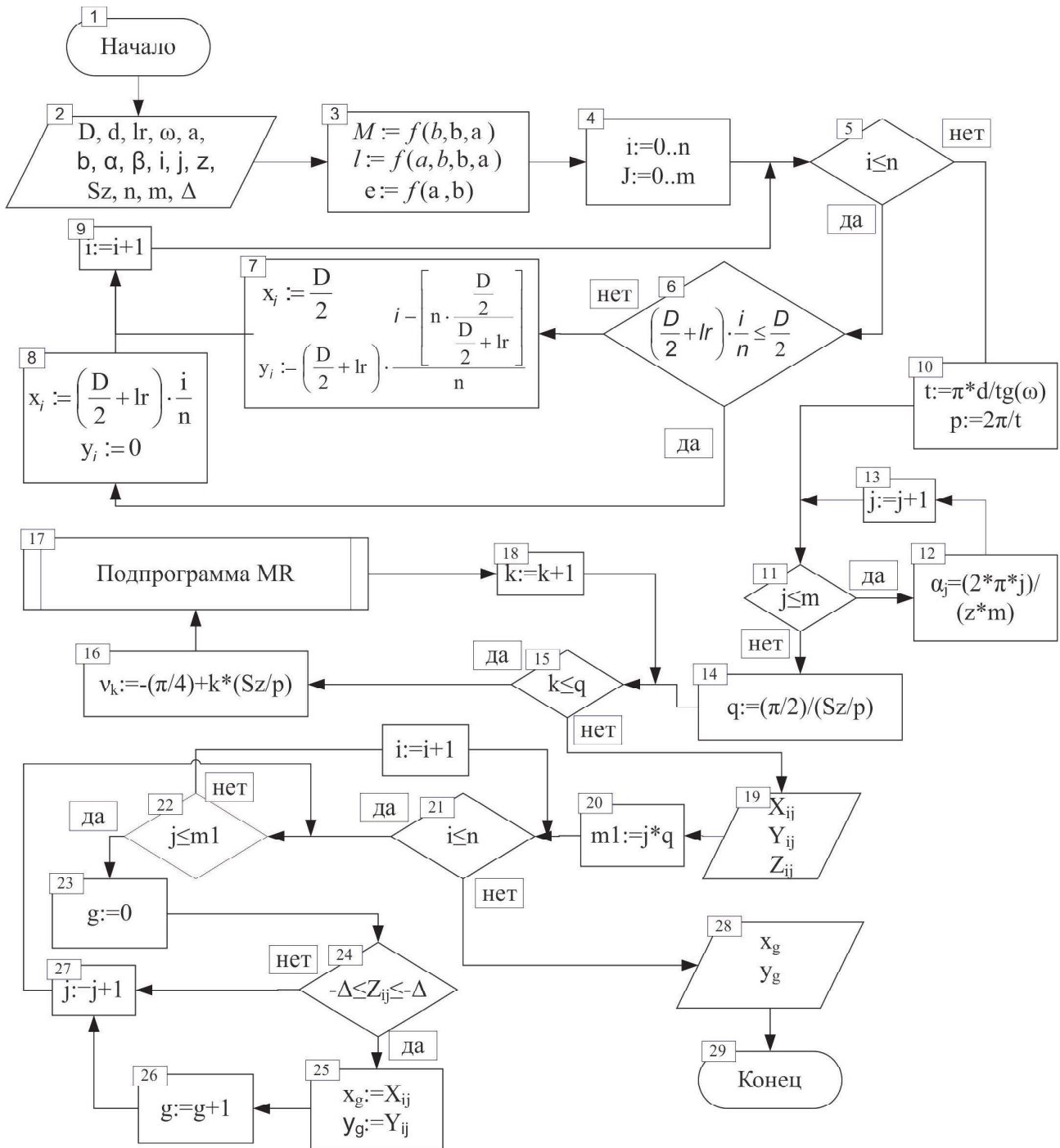
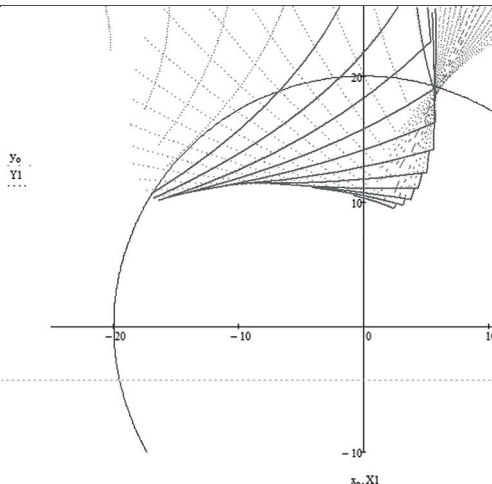
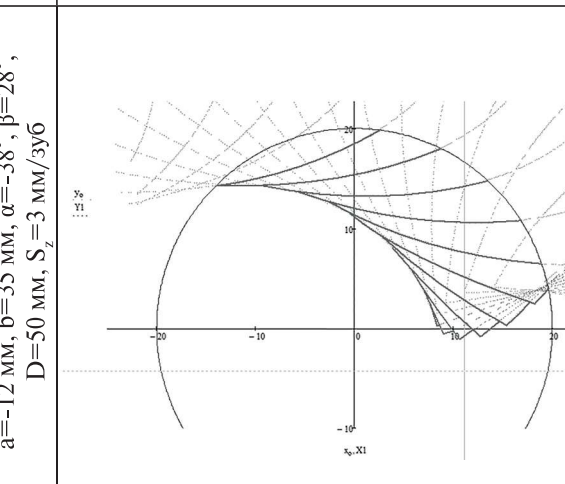
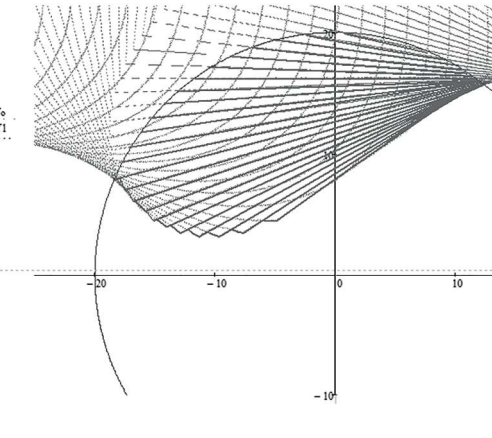
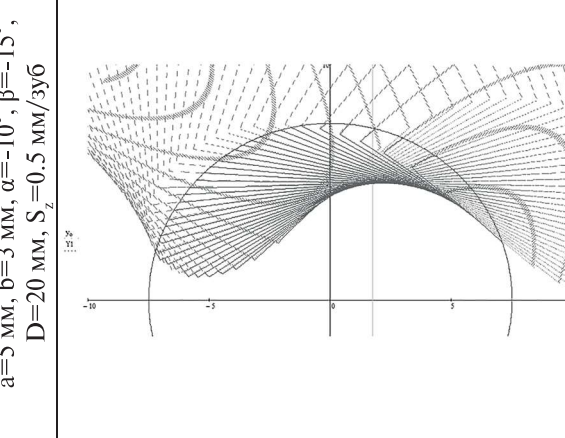
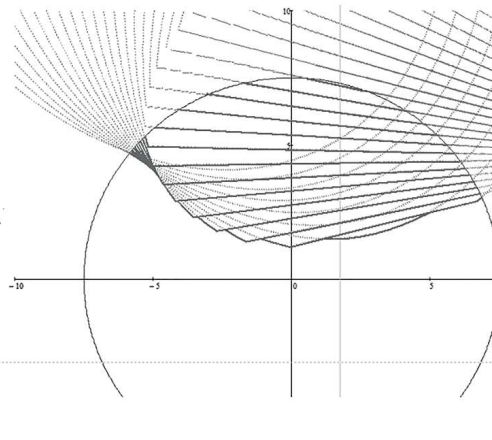
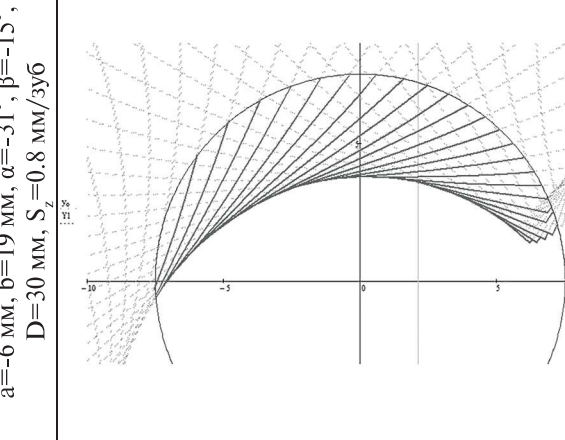


Рис. 2. Блок-схема метода построения схемы резания при формообразовании винтовых поверхностей инструментом прямого профиля

Таблица 2. Результаты определения профиля обрабатываемой винтовой поверхности инструментом стандартного профиля, выполненные в среде Mathcad

	Станочные параметры	Результаты моделирования	Результаты моделирования
	Станочные параметры $a=0$ мм, $b=35$ мм, $\alpha=-30^\circ$, $\beta=15^\circ$, $D=50$ мм, $S_z=2$ мм/зуб		
	Станочные параметры $a=20$ мм, $b=5$ мм, $\alpha=-30^\circ$, $\beta=5^\circ$, $D=46$ мм, $S_z=1$ мм/зуб		
	Станочные параметры $a=13$ мм, $b=4$ мм, $\alpha=-50^\circ$, $\beta=-20^\circ$, $D=20$ мм, $S_z=0.5$ мм/зуб		

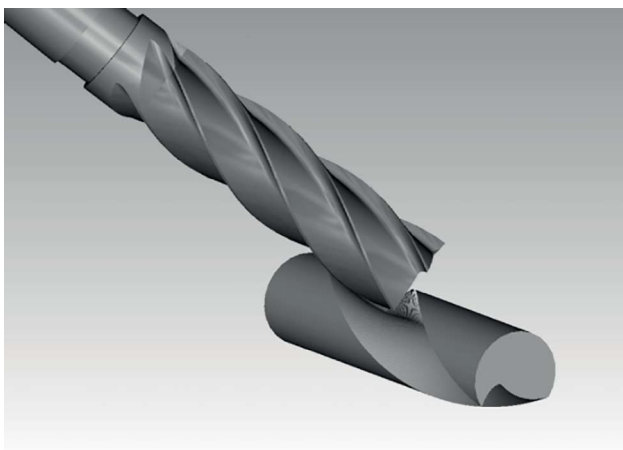


Рис. 3. Обработка концевой фрезой

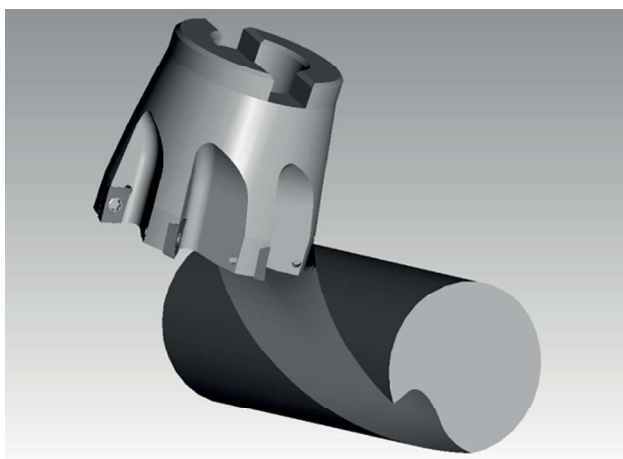


Рис. 4. Обработка торцевой фрезой

параметров установки a , b , α , β и диаметра D фрезы возможны две принципиальные схемы формообразования на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхностей.

Разработанный метод формирования схемы резания для процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля позволяет определять толщины

срезаемых слоев вдоль всей режущей кромки. Более того, он является самостоятельным методом решения обратной задачи профилирования, позволяющим учитывать не только параметры установки и размеры инструмента, но и подачу на зуб [5, 6, 7]. Это даёт возможность использовать данный метод как основу для разработки программного симулятора процесса обработки.

Библиографический список

1. Петухов Ю.Е. Формообразование численными методами. М., Янус-К, 2004 г. — 200 с.
2. Домнин, П.В. Разработка процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментов на основе применения стандартных концевых и торцевых фрез : дис. ... кан. тех. наук : 05.03.07 : защищена 2012 : утв. /Домнин П.В. — Москва, 2012. —199 с.
3. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. — 2017. — № 4 (43). С. 100–104.
4. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Сяочуан Ч. / Математическая модель определения профиля червячных фрез // Вестник машиностроения. — 2020. — № 1. — С. 10–13.
5. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента / В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы — перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. — 2016. С. 86–90.
6. Петухов Ю.Е., Домнин, П.В. / Способ формообразования фасонной винтовой поверхности стандартным инструментом прямого профиля. // Вестник МГТУ «Станкин» № 3 (15), 2011, с. 102–106.
7. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. / Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки на заготовке концевой фрезы / «Известия МГТУ МАМИ» № 2 (12) — 2011. М. С — 156–164.

Домнин Пётр Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

_domnin@rambler.ru

Domnin Petr Valerevich — docent, candidate Sc of Engineering of sub-department of «Instrumental equipment and shaping technology» of MSUT «STANKIN»

_domnin@rambler.ru

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЗАКЛИНИВАНИЯ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОМОМЕНТНОГО ДАТЧИКА

ANALYSIS OF JAMMING CONDITIONS IN ROBOTIC ASSEMBLY USING THE FORCE-TORQUE SENSOR

Целью данной статьи является исследование заклиниваний в процессе сборки цилиндрических соединений на основе создания и проведения экспериментальных исследований и построения математической модели. Описаны результаты экспериментальных исследований. Определены условия возникновения заклиниваний деталей.

The purpose of this article is studying the jamming of the assembly process with cylindrical parts and building the mathematical model to show the dependence of forces and moments on parts' mating depth in the assembly zone. The results of the experiment are described. The conditions for the occurrence of jamming have been determined.

Ключевые слова: роботизированная сборка, условия собираемости, силомоментный датчик.

Keywords: robotic assembly, assembly conditions, force-torque sensor.

Введение

В статье [1] приведены экспериментальные исследования собираемости соединения типа «вал-втулка» при роботизированной сборке. Создана модель двухточечного контакта при роботизированной сборке в квазистатической постановке. Силовое воздействие на вал принималось осевым. Анализ условий заклинивания, представленный в работах [2, 3] показал, что они записаны применительно к сборочным автоматам.

Причина в том, что модели не точно описывают процесс сопряжения, поскольку вал закреплен в схвате, в котором, помимо осевого усилия, могут присутствовать радиальное усилие и изгибающий момент. В данной работе приводится расчет контактных усилий в сопряжении типа «вал-втулка» при двухточечном контакте с учетом закрепления вала в схвате робота в квазистатической постановке. На рис. 1 в точках контакта A и B возникают нормальные силы \vec{N}_A , \vec{N}_B и силы трения \vec{F}_A , \vec{F}_B [2-9]. Система координат $O_{дат} xz$ связана с центральной точкой силомоментного датчика $O_{дат}$, ось $O_{дат} z$ совпадает с осью схвата, а $O_{дат} x$ выбирается так, чтобы вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{дат} xz$. Контактные взаимодействия формируют сборочные усилия F_x , F_z и крутящий момент M_y в центральной точке $O_{дат}$.

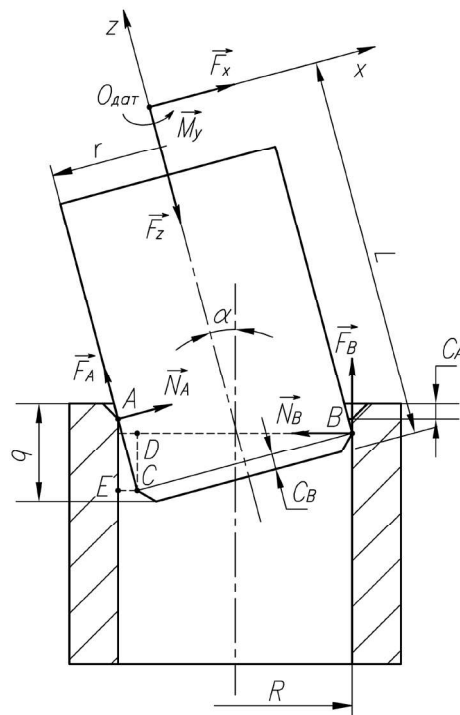


Рис. 1. Схема действия сил на вал при двухточечном контакте

Для определения сборочных усилий применялся силомоментный датчик, установленный на выходном звене робота.

1. Геометрические соотношения

Рассмотрим геометрические соотношения из рис. 1:

$$\begin{aligned} BD &= 2r \cdot \cos \alpha; \\ CE &= 2R - BD = 2R - 2r \cdot \cos \alpha; \\ \tan \alpha &= \frac{CE}{AE} \approx \frac{2R - 2r \cdot \cos \alpha}{q - C_A - C_B}, \end{aligned} \quad (1)$$

где: α – угол перекоса осей вала и отверстия; C_A, C_B – высота фаски на сопрягаемых поверхностях; R, r – радиусы сопрягаемых поверхностей, соответственно отверстия и вала; q – глубина сопряжения.

С учетом допущения о малости углов перекоса принимаем

$$\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha; \quad \cos \alpha = 1. \quad (2)$$

Получаем

$$\alpha \approx \frac{2R - 2r}{q - C_A - C_B} = 2 \frac{R - r}{q - C_A - C_B}. \quad (3)$$

2. Уравнения равновесия, определяющие условия заклинивания

$$\begin{aligned} \sum F_{kx} &= F_x + N_A - N_B \cos \alpha + F_B \sin \alpha = 0; \\ \sum F_{ky} &= -F_z + F_A + N_B \sin \alpha + F_B \cos \alpha = 0; \\ \sum M_O(F_k) &= (L - \frac{q - C_A}{\cos \alpha}) N_A - r F_A - (L - C_B) N_B \cos \alpha + r N_B \sin \alpha + (L - C_B) F_B \sin \alpha + r F_B \cos \alpha + M_Y = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где L – расстояние от торца вала до центра силомоментного датчика.

Рассмотрим предельное состояние равновесия, при котором

$$F_A = f \cdot N_A; \quad F_B = f \cdot N_B. \quad (5)$$

Тогда уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} F_x + N_A - N_B (\cos \alpha - f \sin \alpha) &= 0; \\ F_z - f N_A - N_B (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha) &= 0; \\ [(L - \frac{q - C_A}{\cos \alpha}) - r \cdot f] N_A + [- (L - C_B) \cos \alpha + r \cdot \sin \alpha + (L - C_B) f \sin \alpha + r \cdot f \cos \alpha] N_B + M_Y &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом приближения (3) система уравнений (6) приобретает вид:

$$\begin{aligned} F_x + N_A - N_B (1 - f \alpha) &= 0; \\ F_z - f N_A - N_B (\alpha + f) &= 0; \\ [L - q + C_A - r \cdot f] N_A + [-L + C_B + r \cdot \alpha + (L - C_B) f \cdot \alpha + r \cdot f] N_B + M_Y &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из первого уравнения системы (7) получаем:

$$N_A = -F_x + N_B (1 - f \alpha). \quad (8)$$

Подставим (8) во второе уравнение системы (7) получим:

$$F_z + f \cdot F_x - f \cdot N_B (1 - f \cdot \alpha) - N_B (f + \alpha) = 0. \quad (9)$$

Откуда имеем:

$$N_B = \frac{F_z + f \cdot F_x}{2f + (1 - f^2)\alpha}. \quad (10)$$

С учетом допущения (3) получаем:

$$N_B = \frac{F_z + f \cdot F_x}{2f + 2(1 - f^2) \frac{R - r}{q - C_A - C_B}}. \quad (11)$$

Подставим (11) в (8) с учетом (3) получаем:

$$N_A = -F_x + \frac{F_z + f \cdot F_x}{2f + 2(1 - f^2) \frac{R - r}{q - C_A - C_B}} (1 - 2f \frac{R - r}{q - C_A - C_B}). \quad (12)$$

Подставим (11) и (12) в третье уравнение системы (7) и выразим момент M_Y :

$$M_Y = -(L - q + C_A - r \cdot f) \left[-F_X + \frac{F_Z + f \cdot F_X}{2f + 2(1 - f^2) \frac{R - r}{q - C_A - C_B}} (1 - 2f \frac{R - r}{q - C_A - C_B}) \right] - [-L + C_B + r \cdot f + 2[r + (L - C_B) f] \frac{R - r}{q - C_A - C_B}] \frac{F_Z + f \cdot F_X}{2f + 2(1 - f^2) \frac{R - r}{q - C_A - C_B}}. \quad (13)$$

Однако при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей системы координат: ось $O_{дат} z_{дат}$ направлена вдоль оси вала, а оси $O_{дат} x_{дат}$ и $O_{дат} y_{дат}$ ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения оси вала. С силомоментного датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1} и проекции вектора момента M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1} . Для решения поставленной задачи необходимо представить силу в виде двух составляющих: осевой \bar{F}_Z и радиальной \bar{F}_X , лежащей в плоскости контакта [10]:

$$\bar{F}_Z = F_{Z1} \cdot \bar{k}_1, \text{ где } \bar{k}_1 - \text{орт оси } O_{дат} z_{дат}. \quad (14)$$

Модуль силы \bar{F}_X можно определить как:

$$F_X = \sqrt{F_{X1}^2 + F_{Y1}^2}. \quad (15)$$

Направление вектора \bar{F}_X определяется направляющими косинусами углов между вектором силы и положительными направлениями осей координат, которые определяют положение точек контакта A и B относительно осей $O_{дат} x_{дат}$ и $O_{дат} y_{дат}$. Аналогичным образом определяем вектор момента. Получив с датчика проекции M_{X1}, M_{Y1} вектора $\bar{M}_д$, можно вычислить его модуль [10]:

$$M_д = \sqrt{M_{X1}^2 + M_{Y1}^2}. \quad (16)$$

Практическое применение данной функции может состоять в следующем. Получив значения F_X и F_Z , можно по формуле (13) вычислить значение момента M_Y (назовем его расчетным моментом M_p). Затем его можно сравнить со значением момента, полученным с датчика (назовем его $M_д$). Таким образом формируются условия сборки:

$$\begin{aligned} M_д > M_p &- \text{происходит заклинивание;} \\ M_д \leq M_p &- \text{сборка реализуема.} \end{aligned} \quad (17)$$

На основе этих соотношений программное обеспечение управления роботом получает возможность корректировать взаимное положение вала относительно детали с отверстием, обеспечивая условия собираемости.

3. Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным

датчиком (рис. 2) [1, 9, 10]. Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140 с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали (вал-втулка) жёстко базируются в захватном устройстве 2 и базовом приспособлении 4. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленным роботом, а также регистрируется персональным компьютером 5.

Контактные усилия определены в сборочных операциях типа «вал-втулка». При этом сопряжение осуществлялось на разную глубину. Вал и втулка были изготовлены из одинаковых материалов Ст45. Коэффициент трения определялся экспериментально при различных глубинах сопряжения вала и втулки [10]. Сопряжение выполнялось с зазорами 0,01 мм и 0,04 мм. Фаски на сопрягаемых деталях были равны $C_A = C_B = 0,6$ мм. Для решения поставленной задачи был выбран схват, отвечающий требованиям жесткой фиксации сопрягаемой детали, а также обеспечивающий возможность организации обратной связи в системе управления промышленным роботом [1]. Рассчитанное расстояние от торца вала до центра силомоментного датчика составляло $L = 314$ мм.

В табл. 1, 2 приведены значения составляющих сил и моментов $F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1}, M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1}$ полученные с силомоментного датчика и рассчитанные значения с помощью MATLAB из уравнений (13, 16).

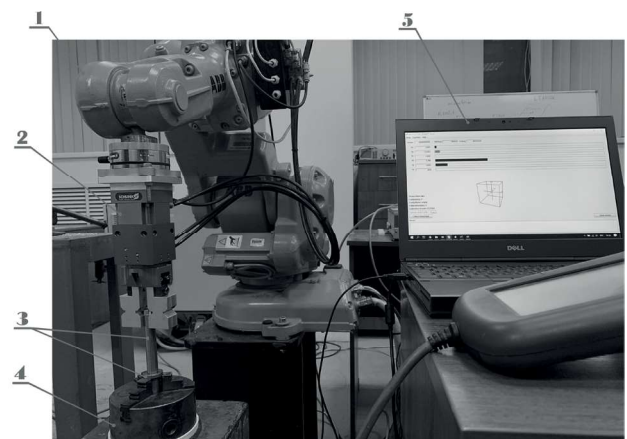


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки: 1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – захватное устройство; 3 – экспериментальные образцы; 4 – базовое приспособление; 5 – персональный компьютер

Таблица 1. Экспериментальные результаты для соединения с зазором 0,01

№	F_{X1}, H	F_{Y1}, H	F_{Z1}, H	$M_{X1}, H.м$	$M_{Y1}, H.м$	$q, мм$	$M_d, H.м$	$M_p, H.м$
1	-1,11496	0,848124	-0,63036	-0,34942	-0,29062	2,25	-0,45449	-0,43852
2	-0,55978	0,768135	-0,66319	-0,34463	-0,21435	2,5	-0,40585	-0,29874
3	-0,68477	0,946373	-0,56997	-0,34942	-0,20731	2,75	-0,40629	-0,36652
4	-0,77932	0,975942	-0,03755	-0,37637	-0,23611	3	-0,4443	-0,38896
5	-0,47134	1,145214	-0,7778	-0,36561	-0,17783	3,25	-0,40656	-0,39045
6	-0,67791	1,167399	-0,25347	-0,37895	-0,22155	3,5	-0,43896	-0,42174
7	-0,56964	1,311655	-0,10473	-0,36374	-0,22343	3,75	-0,42688	-0,44545
8	-0,57496	1,341662	-0,40244	-0,36493	-0,21226	4	-0,42217	-0,45729
9	-0,19754	1,550901	-1,70156	-0,32981	-0,09374	4,25	-0,34287	-0,50263
10	-0,6268	1,609583	-3,07946	-0,40083	-0,20617	4,5	-0,45075	-0,56964
11	-2,93364	1,803294	-27,2065	-0,51208	-1,05378	4,75	-1,17161	-1,38568
12	-6,43799	2,695164	-77,0351	-0,83828	-2,63838	5	-2,76835	-3,12713
13	-11,0309	4,290976	-111,21	-1,22176	-4,36269	5,25	-4,53053	-5,1523
14	-13,5108	6,1016	-150,037	-1,72916	-5,54368	5,5	-5,8071	-6,72017
15	-15,9209	7,414824	-182,595	-2,12935	-6,7695	5,75	-7,0965	-8,1806
16	-18,7312	9,309072	-249,859	-2,65603	-8,76692	6	-9,16043	-10,435
17	-20,7265	9,86052	-272,089	-2,76173	-9,57514	6,25	-9,96547	-11,6421
18	-21,3867	10,35388	-300,234	-2,87386	-10,1767	6,5	-10,5747	-12,6096
19	-22,2149	10,57536	-321,458	-2,99864	-10,9732	6,75	-11,3755	-13,5073
20	-21,5357	10,54395	-337,021	-3,10046	-11,2126	7	-11,6333	-13,8778
21	-23,3313	11,00687	-354,156	-3,23684	-11,9969	7,25	-12,4259	-15,0615

Таблица 2. Экспериментальные результаты для соединения с зазором 0,04

№	F_{X1}, H	F_{Y1}, H	F_{Z1}, H	$M_{X1}, H.м$	$M_{Y1}, H.м$	$q, мм$	$M_d, H.м$	$M_p, H.м$
1	0,108488	-1,3364	-0,06086	0,403255	0,019426	4	0,403723	0,416041
2	0,084076	-1,02156	-0,59791	0,273185	0,037081	5	0,27569	0,310809
3	0,322188	-0,85371	-0,45766	0,131839	0,124923	6	0,181624	0,27558
4	0,52655	-0,29654	-0,34349	0,064052	0,137706	7	0,151874	0,180432
5	0,69553	-0,20696	-0,01849	0,056544	0,219005	8	0,226187	0,223614
6	1,590904	-0,51183	-0,65798	0,108225	0,427218	9	0,440713	0,498368
7	1,711432	-0,4709	-0,39338	0,099414	0,48578	10	0,495848	0,534893
8	1,578544	0,157354	-5,87934	0,074771	0,263763	11	0,274156	0,298584
9	1,682248	1,117812	-39,1272	-0,11972	-0,62879	12	-0,64009	-0,76761
10	1,8618	1,691084	-54,4112	-0,17922	-1,01336	13	-1,02909	-1,34056
11	3,281114	2,306278	-64,6914	-0,23077	-1,02906	14	-1,05462	-1,4995
12	3,85822	3,646636	-72,0355	-0,41839	-1,34261	15	-1,40629	-1,65519
13	3,7045	4,43273	-85,7605	-0,63596	-2,00208	16	-2,10066	-2,42561
14	3,417224	5,555458	-100,827	-0,87878	-2,80304	17	-2,93756	-3,27365
15	5,164672	6,737358	-114,855	-1,15013	-2,86087	18	-3,08341	-3,79435
16	6,606856	7,230966	-117,251	-1,26225	-3,04647	19	-3,29761	-3,92685
17	5,959328	7,547438	-124,22	-1,52754	-3,58633	20	-3,89809	-4,81011
18	7,739128	7,952154	-125,479	-1,6634	-3,57244	21	-3,94072	-4,86447
19	7,065632	8,302542	-135,367	-1,7871	-4,06043	22	-4,4363	-6,0278
20	9,199096	8,42983	-128,947	-1,83242	-3,89989	23	-4,30893	-5,54695
21	10,92925	8,702274	-130,937	-1,91827	-3,8546	24	-4,30554	-5,68447

На рис. 3 показано, как изменялись силы, возникающие в точках контакта в процессе сопряжения цилиндрических деталей. На горизонтальной оси откладываются величины глубины сопряжения q . На вертикальной оси откладываются составляющие главного вектора силы. Для разных глубин сопряжения вала со втулкой рис. 3 а, что видно это обусловлено резким ростом составляющей главного вектора сил F_{z1} после 4,5 мм, а рис. 3 б после 11 мм, что свидетельствует о возникновении заклинивания в зоне сборки.

На рис. 4 представлены график изменения вращающего момента M , обеспечивающего начало совмещения деталей в зависимости от глубины сопряжения вала и втулки. Из графика (рис. 4 а) видно, что в случае зазора равного 0,01 мм значение момента с датчика превышает расчетный момент при глубинах сопряжения более 3,5 мм, то есть выполняется первое из условий (17) и происходит заклинивание. В случае зазора в сопряжении равного 0,04 мм (рис. 4 б) при $q = 12 - 24$ мм первое из условий (17) также выполняется и имеет место заклинивание. Полученные

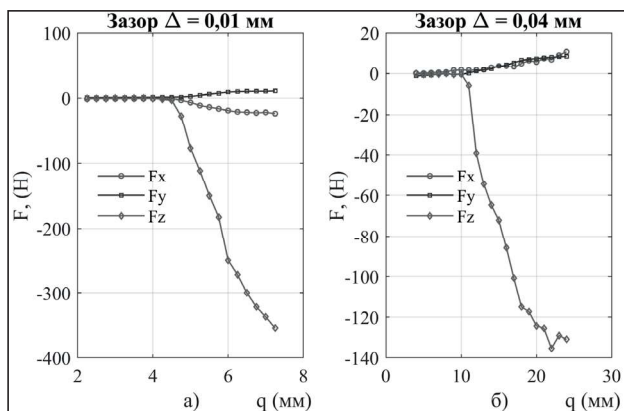


Рис. 3. Зависимость компонент главного вектора сил от глубины сопряжения

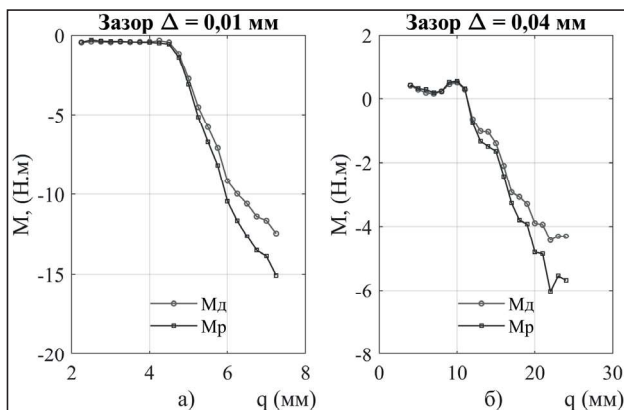


Рис. 4. Сравнение расчетного и экспериментального момента

закономерности изменения компонентов главного вектора сборочных усилий дают возможность регистрировать ситуации заклиниваний деталей и могут быть использованы для создания алгоритмов управления манипулятором.

Заключение

Проведенные исследования дают промежуточный результат разработки контактных состояний сборки с помощью роботов, оснащённых силомоментным датчиком. Из результатов эксперимента видно, что с уменьшением величины зазора заклинивание происходит при меньшей глубине сопряжения. Таким образом, при малом зазоре в соединении зона без заклиниваний отсутствует при жестком базировании независимо от точки приложения результирующей силы, ее модуля и направления. В этом случае при сборке неизбежно заклинивание деталей. Результаты выполненных исследований служат основой для разработки алгоритма управления сборочным роботом с обратной связью на основе управления переходами между контактными состояниями сборочного процесса.

Библиографический список

1. Вартанов М.В., Архипов М.В., Петров В.К., Мищенко Р.С. Экспериментальные исследования условий собираемости при активной роботизированной сборке // «СТИН», 2017, № 4, с. 14–16.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технология сборки в машиностроении. Т. III — 5/ А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др.; под общей редакцией Ю.М. Соломенцева — М., Машиностроение, 2001. — 640 с.
3. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: Монография // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. — 75 с.: 55.
4. Справочник по промышленной робототехнике: в 2 т. / Под ред. Ноффа; пер. с англ. Д.Ф. Миронова. — М.: Машиностроение, 1998. — 480 с.
5. Tang, T., Lin, H.-C., Yu Zhao, Wenjie Chen, & Tomizuka, M. (2016). Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly. 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2016, с. 162–167.
6. Курс робототехники. / Под редакцией канд. техн. наук С. Л. Зенкевича; перевод с английского — М.: Мир, 1990. — 527.
7. Холодкова А.Г., Кристаль М.Г., Штриков Б.Л., Зенкин А.С., Арпентьев Б.М., Андреев А.Г. Технология автоматической сборки / Под. ред. А.Г. Холодковой. — М.: Машиностроение, 2010. — 560 с.
8. Замятин В.К. Технология и автоматизация сборки: учебник для машиностроительных специальностей вузов. — М: Машиностроение, 1993. — 464 с.

9. **Божкова Л.В., Варганов М.В., Шандров Б.В.** Этапы создания алгоритмического обеспечения интеллектуальной роботизированной сборки // «Известия Волгоградского государственного технического университета» № 21 (148), том 12, 2014, с. 59–64.

10. **Vartanov, M.V., Van Dung, N., Van, T.D.** Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance. 2020 International Russian Automation Conference, Сочи, Россия, 2020, С. 977–981.

Варганов Михаил Владимирович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политеха
natalia.vartanova@bk.ru

Петров Владимир Кириллович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» Московского политеха
vkp@hotbox.ru

Нгуен Ван Зунг – аспирант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политеха
nguyendungpt45@gmail.com

Чан Динь Ван – магистрант кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политеха
trandinhvan1221@gmail.com

Vartanov Mikhail Vladimirovich – Doctor of Engineering sciences, prof., professor of department «Technologies and equipment of mechanical engineering» of the Moscow Polytechnic University
natalia.vartanova@bk.ru

Petrov Vladimir Kirillovich – Associate Professor, Ph.D. tech. Sci., Associate Professor of department «Technical Mechanics» of the Moscow Polytechnic University
vkp@hotbox.ru

Nguyen Van Dung – PhD student of department «Technologies and equipment of mechanical engineering» of the Moscow Polytechnic University
nguyendungpt45@gmail.com

Tran Dinh Van – Master of department «Technologies and equipment of mechanical engineering» of the Moscow Polytechnic University
trandinhvan1221@gmail.com

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РОДРИГА В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЁМНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

SOLUTION OF THE RODRIGUEZ EQUATION IN MODELING VOLUMETRIC GEOMETRIC ACCURACY OF MULTI-COORDINATE SYSTEMS

Рассмотрено решение уравнения Родрига для определения объёмной точности многокоординатного оборудования (станков, контрольно-измерительных машин и приборов) с программным управлением. Инверсным методом выполняется проверка решения в пакете прикладной программы Maple.

The article describes the solution to the Rodrigues equation for determining the volumetric accuracy of multi-axis CNC-controlled systems. The results are checked by solving the inverse problem in Maple.

Ключевые слова: многокоординатные системы, лазерные измерения, объёмная точность, уравнение Родрига, вектор поворота.

Keywords: multi-axis systems, laser measurements, volumetric accuracy, the Rodriguez equation.

Введение

Многокоординатные системы с программно управляемым перемещением узлов и механизмов составляют особенность современного машиностроения, как в части технологического оборудования (станки, промышленные роботы), так и в части измерительной техники (координатно — измерительные машины). Высокоэффективное применение таких систем в данный момент уже невозможно без системного повышения объёмной точности (ОТ) исполнительного оборудования, то есть способности точно воспроизводить измерительным наконечником или режущей кромкой инструмента сложные трёхмерные поверхности.

Впервые понятие объёмной точности введено в работе McKeown P.A., Loxham J. [4], и в последнее десятилетие проблематика повышения ОТ получила широкое распространение [5, 6]. В отечественных публикациях данное понятие введено в работах Серкова Н.А. [7]. Количественно объёмная точность характеризуется объёмной погрешностью (ОП), которая для каждой точки рабочего пространства обработки представляет собой вектор, направленный от заданного (номинального) положения некоторого полюса инструмента к его действительному положению. Для исследования объёмной точности используется множество методов и подходов: метод Денавита-Хартенберга [8], метод описания кинематики

твёрдого тела (rigid body kinematics) [9], кинематики множества твёрдых тел (multiple-body kinematics) [10], методы матричной симуляции [11]. В отдельных статьях рассматриваются не только систематические, но и случайные характеристики точности оборудования [12].

Конечная цель исследования объёмной точности — построение алгоритмов коррекции реального движения механической системы в обобщенном пространстве относительно другого, рассматриваемого при условии «идеального» расположения осей кинематических пар системы. Вместе с тем известно, что, например, при портальной трехкоординатной кинематике оси телескопических пар станка не образуют идеальный ортогональный триэдр, и это несоответствие увеличивается по мере износа оборудования.

Для коррекции ошибок трехкоординатного портального движения, вызванного этим несоответствием, необходимо знать истинное положение физических осей поступательных перемещений. Задача усложняется, если в обобщенное пространство включить четвертую ось вращательного типа. Корректировать ошибки движения только за счет поступательного движения по осям портальной кинематической схемы в этом случае не удастся. Для решения задачи коррекции движения здесь необходимо знать истинное положение в пространстве оси вращения четвертой кинематической пары.

Поясним сказанное рисунком 1, на котором условно показан механизм с тремя поступательными движениями в неподвижной декартовой системе координат $X_0 Y_0 Z_0$ и четвертым звеном, являющимся ротором в кинематической паре вращательного типа, со статором которой связана система координат $X_1 Y_1 Z_1$, сонаправленная с системой $X_0 Y_0 Z_0$. Поступательные линейные движения осуществляются по физическим осям *недекартовой в общем случае* системы XYZ с общим началом в т.О, в силу конструктивных неточностей не совпадающим с началом системы $X_0 Y_0 Z_0$. Вектор 3×1 обобщенных координат линейных перемещений обозначим через \bar{q} .

При повороте относительно реальной оси пары, направление которой задается ортом \bar{e} , звено-эффектор A переходит в положение A_1 , которое в системе $X_1 Y_1 Z_1$ можно получить, например, на основании теории конечных поворотов. Далее получить радиус-вектор $r_A(\bar{q})$ полюса эффектора в неподвижной системе $X_0 Y_0 Z_0$, можно по формуле:

$$\bar{r}_A = \bar{r}_1 + C\bar{q} + \bar{r}_a,$$

где C – постоянная 3×3 калибровочная матрица, получаемая на основании калибровочной процедуры поступательных (линейных) движений в физических осях телескопических пар OX, OY, OZ ;

\bar{r}_1 – радиус-вектор начала декартовой системы $X_1 Y_1 Z_1$ в декартовой системе $X_0 Y_0 Z_0$;

\bar{r}_a – радиус-вектор полюса эффектора в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$.

В калибровочной процедуре, которая принципиально известна и потому в данной работе не рассматривается, получают величины C и \bar{r}_1 . Остается задача вычисления вектора \bar{r}_a , который полностью зависит от истинного направления орта \bar{e} оси вращательной кинематической пары.

Истинное направление этой оси, хотя и отличается от номинального на неизвестную пока величину, является неизменным и не зависит от движения в телескопических кинематических парах, что и позволяет определить ее орт \bar{e} .

Формула Родрига

Для нахождения реального положения оси вращательной пары, как будет показано ниже, возможно использовать формулу Родрига:

$$\bar{\rho}' = \bar{\rho} + \frac{1}{1 + \frac{1}{4}|\bar{\theta}|^2} \bar{\theta} \times \left(\bar{\rho} + \frac{1}{2} \bar{\theta} \times \bar{\rho} \right)$$

$\bar{\rho}$ – радиус-вектор начального положения полюса эффектора;

$\bar{\rho}'$ – радиус-вектор его конечного положения;

$\bar{\theta} = 2tg \frac{\chi}{2} \bar{e}$, где χ – угол поворота вектора $\bar{\rho}$.

При применении данной формулы возможно решать две задачи:

- прямую задачу ориентации твердого тела, когда при известном векторе поворота находят изменение положения тела в пространстве;
- обратную задачу, в которой при известных начальном и конечном положениях тела определяют вектор конечного поворота при известной величине его модуля.

Если прямая задача широко практикуется в аналитической механике, то при решении обратной задачи, когда формула Родрига рассматривается, как уравнение относительно $\bar{\theta}$, получаются, как ни странно, неудовлетворительные результаты в работе прикладных программ. Так, в Mathcad аналитическое решение в символьном виде не находится. Maxima не смогла найти аналитическое решение за четыре с половиной часа, и в итоге сама остановилась. Maple

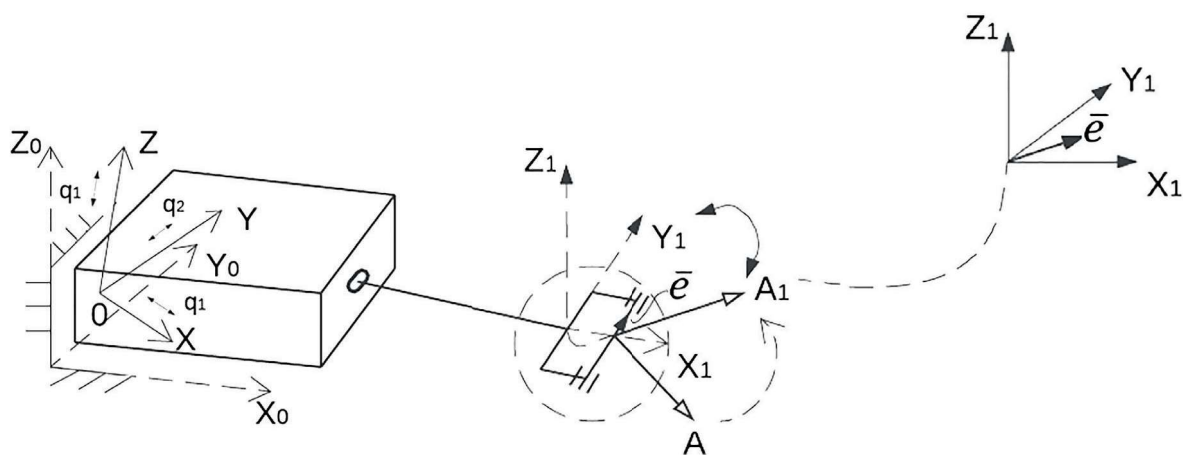


Рис. 1. Отклонение физической оси поворота от идеального положения

спустя сутки аналитических вычислений получает решение на сорока страницах, и с точки зрения математики такое решение характеризуется как необозримое, что исключает его практическую значимость.

Сказанное иллюстрирует следующая таблица.

Поэтому авторами предложено свое аналитическое решение, рассматриваемое ниже.

Решение уравнения Родрига

Запишем формулу Родрига:

$$\vec{\rho}' = \vec{\rho} + \frac{1}{1 + \frac{1}{4}|\vec{\theta}|^2} \vec{\theta} \times \left(\vec{\rho} + \frac{1}{2} \vec{\theta} \times \vec{\rho} \right) \quad (1)$$

Пусть векторы $\vec{\rho}'$ и $\vec{\rho}$ известны (например, даны по результатам эксперимента).

Требуется найти вектор поворота $\vec{\theta}$ при его известном модуле $|\vec{\theta}|$.

На Рис. 2. показана иллюстрация векторов, участвующих в формуле Родрига.

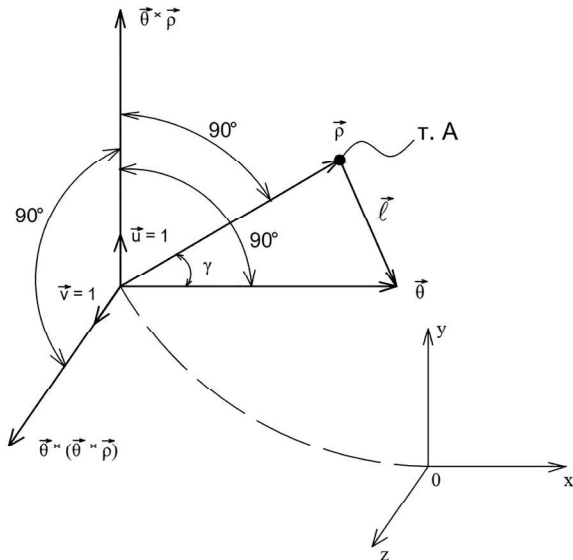


Рис. 2. Иллюстрация формулы Родрига

Пусть $\alpha = 1 + \frac{1}{4}|\vec{\theta}|^2$, $x_A = \rho_1$, $y_A = \rho_2$, $z_A = \rho_3$.

Перепишем формулу (1) в виде:

$$2\alpha \vec{\Delta\rho} = 2\vec{\theta} \times \vec{\rho} + \vec{\theta} \times (\vec{\theta} \times \vec{\rho}), \text{ где } \vec{\Delta\rho} = \vec{\rho}' - \vec{\rho} = \vec{r} \quad (2)$$

и далее будем ее рассматривать, как уравнение относительно $\vec{\theta}$. При этом проекции векторов на оси системы координат $Oxyz$ будем сопровождать индексами 1, 2, 3, а орты осей Ox , Oy , Oz обозначим \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} соответственно.

Умножая скалярно уравнение (2) на $\vec{\theta}$, приходим к уравнению (3):

$$2\alpha (\vec{r}, \vec{\theta}) = 0 + 0 = 0 \Rightarrow r_1\theta_1 + r_2\theta_2 + r_3\theta_3 = 0 \quad (3)$$

Умножая скалярно (2) на $\vec{\rho}$, получаем уравнение (4):

$$2\alpha (\vec{r}, \vec{\rho}) = (\vec{\theta} \times (\vec{\theta} \times \vec{\rho}), \vec{\rho}) \quad (4)$$

Далее замечаем выполнение следующих равенств:

$$\vec{\theta} \times \vec{\rho} = |\vec{\theta}||\rho| \sin \gamma \cdot \vec{u}$$

$$\vec{\theta} \times (\vec{\theta} \times \vec{\rho}) = |\vec{\theta}|^2 |\rho| \cdot \sin \gamma \cdot \vec{v}$$

$$(\vec{\theta} \times (\vec{\theta} \times \vec{\rho}), \vec{\rho}) = |\vec{\theta}|^2 |\rho|^2 \sin \gamma \cdot \cos(90^\circ + \gamma) = -|\vec{\theta}|^2 |\rho|^2 \sin^2 \gamma$$

Отсюда получим:




$$\sin^2 \gamma = -2\alpha \frac{(\vec{r}, \vec{\rho})}{|\vec{\theta}|^2 |\rho|^2}, \quad \cos^2 \gamma = 1 + 2\alpha \frac{(\vec{r}, \vec{\rho})}{|\vec{\theta}|^2 |\rho|^2}$$

и, следовательно:

$$\cos \gamma = \sqrt{\frac{|\vec{\theta}|^2 |\rho|^2 + 2\alpha (\vec{r}, \vec{\rho})}{|\vec{\theta}|^2 |\rho|^2}} \quad (5)$$

Теперь найдем аналитическое выражение для уравнения (4), последовательно вычисляя векторные

Таблица 1. Результаты решения уравнения Родрига пакетами прикладных программ

	Пакет прикладных программ	Решение/проблема
	Mathcad	Аналитическое решение в символьном виде не найдено
	Maxima	4,5 часа поиска аналитического решения – решение не найдено
	Maple	25 часов – аналитическое решение в виде 40 страниц текста (решение необозримое)

произведения $\bar{\theta} \times \bar{\rho}$ и далее $\bar{\theta} \times (\bar{\theta} \times \bar{\rho})$. Выполняется:

$$\bar{\theta} \times \bar{\rho} = \bar{i}(\theta_2 \rho_3 - \rho_2 \theta_3) + \bar{j}(-\theta_1 \rho_3 + \rho_1 \theta_3) + \bar{k}(\theta_1 \rho_2 - \rho_1 \theta_2)$$

Введем замену переменных:

$$\begin{aligned} \theta'_1 &= \theta_2 \rho_3 - \rho_2 \theta_3 \\ \theta'_2 &= -\theta_1 \rho_3 + \rho_1 \theta_3 \\ \theta'_3 &= \theta_1 \rho_2 - \rho_1 \theta_2 \end{aligned}$$

Используя новые переменные, запишем выражение для $\bar{\theta} \times (\bar{\theta} \times \bar{\rho})$:

$$\begin{aligned} \bar{\theta} \times (\bar{\theta} \times \bar{\rho}) &= \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ \theta'_1 & \theta'_2 & \theta'_3 \end{vmatrix} = \bar{i}(\theta_2 \theta'_3 - \theta'_2 \theta_3) + \bar{j}(-\theta_1 \theta'_3 + \theta'_1 \theta_3) + \bar{k}(\theta_1 \theta'_2 - \theta'_1 \theta_2) \\ &= \bar{i}[\theta_2(\theta_1 \rho_2 - \rho_1 \theta_2) - \theta_3(\rho_1 \theta_3 - \rho_3 \theta_1)] \\ &= \bar{j}[\theta_3(\theta_2 \rho_3 - \rho_2 \theta_3) - \theta_1(\theta_1 \rho_2 - \rho_1 \theta_2)] \\ &= \bar{k}[\theta_1(\rho_1 \theta_3 - \rho_3 \theta_1) - \theta_2(\theta_2 \rho_3 - \rho_2 \theta_3)] \\ &= \bar{i}(\rho_2 \theta_1 \theta_2 - \rho_1 \theta_2^2 - \rho_1 \theta_3^2 + \rho_3 \theta_1 \theta_2) \\ &= \bar{j}(\rho_3 \theta_2 \theta_3 - \rho_2 \theta_3^2 - \rho_2 \theta_1^2 + \rho_1 \theta_1 \theta_2) \\ &= \bar{k}(\rho_1 \theta_1 \theta_3 - \rho_3 \theta_1^2 - \rho_3 \theta_2^2 + \rho_2 \theta_2 \theta_3) \end{aligned}$$

Отсюда находим:

$$\begin{aligned} (\bar{\theta} \times (\bar{\theta} \times \bar{\rho}), \bar{\rho}) &= \rho_1 \rho_2 \theta_1 \theta_2 - \rho_1^2 \theta_2^2 - \rho_1^2 \theta_3^2 + \rho_1 \rho_3 \theta_1 \theta_3 + \\ &+ \rho_2 \rho_3 \theta_2 \theta_3 - \rho_2^2 \theta_3^2 - \rho_2^2 \theta_1^2 + \rho_1 \rho_2 \theta_1 \theta_2 + \rho_1 \rho_3 \theta_1 \theta_3 - \rho_3^2 \theta_1^2 - \rho_3^2 \theta_2^2 + \rho_3 \rho_2 \theta_2 \theta_3 = \\ &= -(\rho_1 \theta_2 - \rho_2 \theta_1)^2 - (\rho_1 \theta_3 - \rho_3 \theta_1)^2 - (\rho_2 \theta_3 - \rho_3 \theta_2)^2 \end{aligned}$$

Следовательно, уравнение (4) получаем в виде (6):

$$(\rho_1 \theta_2 - \rho_2 \theta_1)^2 + (\rho_1 \theta_3 - \rho_3 \theta_1)^2 + (\rho_2 \theta_3 - \rho_3 \theta_2)^2 = -2\alpha(\bar{r}, \bar{\rho}) \quad (6)$$

При этом выполняются следующие равенства:

$$\begin{cases} \theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2 = |\bar{\theta}|^2 \\ ((\theta_1 - \rho_1)^2 + (\theta_2 - \rho_2)^2 + (\theta_3 - \rho_3)^2) = l^2 \end{cases}$$

$|\bar{\theta}|^2$ – известная величина, равная $4tg^2 \frac{\chi}{2}$ где известен χ – угол поворота вектора $\bar{\rho}$

Раскрывая скобки, получим:

$$\theta_1^2 - 2(\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 + \theta_3 \rho_3) + \theta_2^2 + \theta_3^2 + \rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_3^2 = l^2 \text{ или:}$$

$$\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 + \theta_3 \rho_3 = \frac{|\bar{\rho}|^2 + |\bar{\theta}|^2 - l^2}{2} = c \quad (7)$$

Поскольку $l^2 = |\bar{\rho}|^2 + |\bar{\theta}|^2 - 2|\bar{\rho}||\bar{\theta}|\cos \gamma$, то в силу формулы (5) приходим к выражению:

$$c = |\bar{\rho}| |\bar{\theta}| \cos \gamma = \sqrt{|\bar{\theta}|^2 |\bar{\rho}|^2 + 2\alpha(\bar{r}, \bar{\rho})}$$

Уравнение (7) объединяем с уравнением (3):

$$\begin{cases} \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 + \theta_3 \rho_3 = c \\ r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2 + r_3 \theta_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Теперь из (8) выразим через θ_3 величины θ_1, θ_2 :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{r_2 c}{r_2 \rho_1 - r_1 \rho_2} + \frac{r_3 \rho_2 - r_2 \rho_3}{r_2 \rho_1 - r_1 \rho_2} \theta_3 = a_1 + b_1 \theta_3 \\ \theta_2 &= \frac{r_1 c}{r_1 \rho_2 - r_2 \rho_1} + \frac{r_3 \rho_1 - r_1 \rho_3}{r_1 \rho_2 - r_2 \rho_1} \theta_3 = a_2 + b_2 \theta_3 \end{aligned} \quad (9)$$

Подставив данные величины в уравнение (6), получим:

$$\begin{aligned} &(\rho_1(a_2 + b_2 \theta_3) - \rho_2(a_1 + b_1 \theta_3))^2 + (\rho_1 \theta_3 - \rho_3(a_1 + b_1 \theta_3))^2 + \\ &+ (\rho_2 \theta_3 - \rho_3(a_2 + b_2 \theta_3))^2 = -2\alpha(\bar{r}, \bar{\rho})^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Введем обозначения $\rho_{13} = \rho_1^2 + \rho_3^2$; $\rho_{23} = \rho_2^2 + \rho_3^2$; $\rho_{12} = \rho_1^2 + \rho_2^2$.

После приведения однородных членов в (10) приходим к уравнению:

$$\begin{aligned} &(\rho_{13} b_2^2 + \rho_{23} b_1^2 + \rho_{12} - 2\rho_1 \rho_2 b_1 b_2 - 2\rho_1 \rho_3 b_1 - 2\rho_2 \rho_3 b_2) \theta_3^2 + \\ &+ (2\rho_{13} a_2 b_2 + 2\rho_{23} a_1 b_1 - 2\rho_1 \rho_2 (b_2 a_1 + b_1 a_2) - 2\rho_1 \rho_3 a_1 - 2\rho_2 \rho_3 a_2) \theta_3 + \\ &+ \rho_{13} a_2^2 + \rho_{23} a_1^2 - 2\rho_1 \rho_2 a_2 a_1 = -2\alpha(\bar{r}, \bar{\rho}) \end{aligned}$$

Обозначая:

$$\begin{aligned} \rho_{13} b_2^2 + \rho_{23} b_1^2 + \rho_{12} - 2\rho_1 \rho_2 b_1 b_2 - 2\rho_1 \rho_3 b_1 - 2\rho_2 \rho_3 b_2 &= L_2 \\ 2\rho_{13} a_2 b_2 + 2\rho_{23} a_1 b_1 - 2\rho_1 \rho_2 (b_2 a_1 + b_1 a_2) - 2\rho_1 \rho_3 a_1 - 2\rho_2 \rho_3 a_2 &= L_1, \\ \rho_{13} a_2^2 + \rho_{23} a_1^2 - 2\rho_1 \rho_2 a_2 a_1 &= L_0 \end{aligned}$$

решение по θ_3 , полагая угол γ острым, получаем в виде:

$$\theta_3 = \frac{-L_1 + \sqrt{L_1^2 - 4L_2(L_0 + 2\alpha(\bar{r}, \bar{\rho}))}}{2L_2}.$$

После этого по формулам (9) находим значения θ_1 и θ_2 . Вектор $\bar{\theta}$ найден. Деля $\bar{\theta}$ на $|\bar{\theta}|$, находим орт e оси поворота.

Проверка решения в программном пакете Maple

Для проверки решения авторами был использован инверсный метод, реализованный в Maple. По априорно задаваемым компонентам векторов $\bar{\theta}$ и $\bar{\rho}$ проверялся на валидность алгоритм, описанный выше. По результатам неоднократного моделирования компоненты вектора $\bar{\theta}$ непременно совпадали с задаваемыми с точностью до четвертого знака, с которой проводились сами вычисления.

При этом получались пары корней, что было обусловлено решением данного уравнения в зависимости от величины угла γ , острого или тупого.

Заключение

В работе предложен алгоритм вычисления реального положения оси вращательной кинематической пары в задачах объемной точности механического движения системы порталного типа с дополнительной парой вращения.

Алгоритм основан на решении формулы Родрига в обратной аналитической задаче, т. е. нахождении вектора конечного поворота известного модуля по

известным начальному и конечному значениям характеристического вектора вращаемого твердого тела.

В отличие от распространенной прямой аналитической задачи, когда при известном по направлению и модулю векторе конечного поворота и начальному значению характеристического вектора тела находят его конечное значение, обратная задача формулы Родрига, рассматриваемой как уравнение, широко не анализируется в литературе. Это, видимо, обусловлено нелинейностью при векторном характере этого уравнения, т.е. фактически необходимостью решения нелинейной взаимосвязанной системы уравнений 2-го порядка. Обращение авторов статьи к известным программным пакетам получения аналитических решений на основе символьной математики не привели к успеху, что и заставило их искать оригинальное аналитическое решение самостоятельно.

Результаты работы позволяют расширить размерность анализируемого на объемную точность пространства обобщенных координат системы с трех до четырех, что может служить основой достижения в дальнейшем размерности универсального обобщенного пространства управляемой механической системы, при этом снижая объем вероятностных оценок в задачах ее объемной точности. Это будет способствовать построению сверхточных систем управляемого механического движения с функциональными возможностями решать задачи микроразмерной точности и выше.

Библиографический список

1. Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskii V.I., Emelyanov P.N. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry. // Measurement Techniques. 2013. V. 55. N 11. P. 1311–1315.
2. Teleshevskii V.I., Sokolov V.A., Pimushkin Y.I. Accuracy Improvement of Multi-Axis Systems Based on Laser Correction of Volumetric Geometric Errors // Journal of Physics: Conference Series, 2018, 998 (1), 012034.
3. Teleshevskii V.I., Sokolov V.A., Pimushkin Y.I. On the problem of laser error correction of multi-axis influence of loading on laser accuracy correction of multi-axis systems // Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1260 (3), 032038.
4. McKeown P. A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines // Ann. CIRP. 1973. N 22 (1).
5. Schwenke H. e. a. Geometric error management and compensation of machines — an update // Ann. CIRP. 2008. N 57. P. 660–675.
6. Schwenke H., Franke M., Hannaford J. Error mapping of CMMs and Machine tools by a single tracking interferometer // Ann. CIRP. 2005. N 54 (1). P. 475–478.
7. Серков Н.А. Методы и средства измерений объёмной точности многокоординатных станков с ЧПУ. // Вестник научно-технического развития. 2012. № 3 (55). С. 26–46.
8. Lamikiz, L.N., López de Lacalle, O., Ocerin, D., Díez, E. Maidagan. The Denavit and Hartenberg approach applied to evaluate the consequences in the tool tip position of geometrical errors in five-axis milling centres. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2008. — № 37. С. 122–139.
9. Rahman, M., Heikkala, J., Lappalainen, K. Modeling measurement and error compensation of multi-axis machine tools. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2000. — № 40. — P. 1535–1546
10. Okafor, A.C., Ertekin, Y.M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2000. — № 40 (8). — P. 1199–1213
11. Lin, Y., Shen, Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2003. — 21. — 243–248.
12. Ahn, K. Gee., Cho, D.W. An analysis of the volumetric error uncertainty of a three axis machine tool by beta distribution. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2000. — 40. — 2235–2248.
13. Cheng, Qiang & Feng, Qiunan & Liu, Zhifeng & Gu, Peihua & Cai, Ligang. (2015). Fluctuation prediction of machining accuracy for multi-axis machine tool based on stochastic process theory. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 229. 2534–2550. 10.1177 / 0954406214562633.

Стебулянин Михаил Михайлович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mmsteb@rambler.ru

Пимушкин Ярослав Игоревич — старший преподаватель кафедры измерительных информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
yaroslav-pimushkin@yandex.ru

Steblyanin Mikhail Mihailovich – D. Sc. in Engineering, Associate professor, professor of the sub-department «High effective machining technologies» of MSUT «STANKIN»

mmsteb@rambler.ru

Pimushkin Yaroslav Igorevich – senior lecturer of the sub-department «Measuring Information Systems and Technologies» of MSUT «STANKIN»

yaroslav-pimushkin@yandex.ru

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.735.016.2

А.А. Зеленский, Ю.А. Валюкевич., А.В. Алепко, В.В. Дубовсков
A.A. Zelensky, U.A. Valukevich, A.V. Alepko, V.V. Dubovskov

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ВОСЕМЬЮ ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ

PLATFORM MOVEMENT CONTROL SYSTEM OF PARALLEL MANIPULATOR WITH EIGHT FLEXIBLE LINKS

Тросовые манипуляторы с параллельной кинематической структурой находят всё большее применение в промышленном производстве, строительстве, медицинской технике. В настоящей работе рассмотрена кинематическая схема восьмизвенного манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями. Выбран способ решения прямой и обратной задач кинематики, на основе которого реализован способ планирования перемещения рабочего органа. Рассмотрен вариант реализации системы формирования управляющих воздействий по каждой из обобщённых координат. Система управления реализована аппаратным способом. Рассмотрены общая структурная схема системы управления и схема формирования управляющего воздействия по обобщённой координате.

Cable manipulators with a parallel kinematic structure are increasingly used in industrial production, construction, and medical technology. In this paper, we consider the kinematic diagram of an eight-link manipulator of a parallel structure with flexible links. A method for solving direct and inverse problems of kinematics is selected, on the basis of which a method for planning the movement of the working body is implemented. A variant of the implementation of the system for the formation of control actions for each of the generalized coordinates is considered. The control system is implemented in hardware. The general structural diagram of the control system and the diagram of the formation of the control action along the generalized coordinate are considered.

Ключевые слова: манипулятор параллельной структуры, манипулятор с гибкими звеньями, прямая и обратная задачи кинематики, планирование траектории, аппаратная система управления.

Keywords: manipulator of parallel structure, manipulator with flexible links, forward and inverse problems of kinematics, trajectory planning, hardware control system.

Введение

Манипуляторы параллельной кинематической структуры на основе гибких звеньев в последнее время находят применение всё в большем количестве областей человеческой деятельности. Это обусловлено низкой энергоёмкостью, относительной простотой механической конструкции и существенно большей зоной обслуживания, чем у традиционных роботов с жесткими механическими звеньями. Это позволяет применять подобные манипуляторы в различных областях, таких как строительство гражданских и промышленных зданий и сооружений [1], в медицине в качестве реабилитационных тренажёров, для создания уникальных телескопов [2, 3], а также для

производства различных работ, связанных с перемещением грузов на большие расстояния вне промышленных зданий и сооружений. Относительным недостатком манипулятора на основе гибких звеньев, в качестве которых используются тросы, является необходимость поддержания постоянного напряжённого состояния звена для получения необходимой жесткости конструкции и высокой точности перемещения рабочего органа. В связи с этим усложняется и становится избыточной кинематическая схема манипулятора. Однако избыточность кинематической схемы компенсируется жесткостью и точностью отработки заданного положения, которые сравнимы с конструкциями обычных манипуляторов с жесткими

звеньями [4, 5]. При этом также усложняется алгоритм работы и аппаратная реализация системы управления манипулятором за счёт увеличения количества звеньев [6]. Традиционно системы планирования траектории и формирования управляющих воздействий на электроприводы звеньев используют программно-аппаратные решения на базе микроконтроллеров. В настоящей работе рассмотрен аппаратный вариант реализации системы управления для восьмизвенного манипулятора параллельной кинематической структуры с гибкими звеньями.

Целью исследования является разработка аппаратной системы управления восьмизвенного манипулятора параллельной кинематической структуры с гибкими звеньями.

1 Кинематическая схема манипулятора

Кинематическая схема восьмизвенного манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями представлена на рисунке 1. На рисунке приняты следующие обозначения:

X_1, Y_1, Z_1 – длина рёбер параллелепипеда представляющего собой основание манипулятора;

$M_1 - M_8$ – мотор-редукторы с барабанами, каждый из которых представляет собой комплектный электропривод, реализующий функции регулирования тока и скорости;

$ABCD$ – платформа прямоугольной формы размером $a \times b$ ($AB = CD = a$ и $AD = BC = b$), являющаяся рабочим органом манипулятора;

$L_1 - L_8$ – длины звеньев манипулятора;

$M(x, y, z)$ – абсолютные координаты положения рабочего органа манипулятора (геометрический центр платформы).

В работе [8] приведены уравнения прямой и обратной задач кинематики, на основе которых реали-

зована программа управления перемещением рабочего органа манипулятора.

Обратная задача кинематики по положению при плоскопараллельном относительно основания или вертикальном перемещении платформы характеризуется уравнениями

$$\left\{ \begin{aligned} L_1 &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + (Z_1 - z)^2}, \\ L_2 &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(Y_1 + \frac{b}{2}\right)^2 + (Z_1 - z)^2}, \\ L_3 &= \sqrt{\left(X_1 + \frac{a}{2} - x\right)^2 + \left(Y_1 - \frac{b}{2} - y\right)^2 + (Z_1 - z)^2}, \\ L_4 &= \sqrt{\left(X_1 + \frac{a}{2} - x\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + (Z_1 - z)^2}, \\ L_5 &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + z^2}, \\ L_6 &= \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(Y_1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + z^2}, \\ L_7 &= \sqrt{\left(X_1 + \frac{a}{2} - x\right)^2 + \left(Y_1 + \frac{b}{2} - y\right)^2 + z^2}, \\ L_8 &= \sqrt{\left(X_1 + \frac{a}{2} - x\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + z^2}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Любое из уравнений системы (1) может быть представлено в следующем виде:

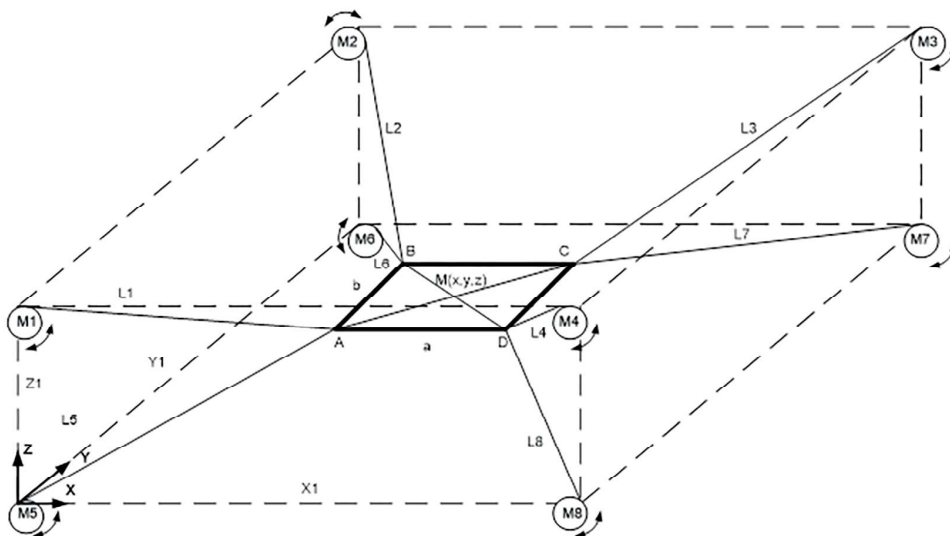


Рис. 1. Кинематическая схема восьмизвенного манипулятора

$$L_i = \sqrt{\left(k_x(i) \cdot x + \frac{k_a(i) \cdot a}{2} + k_{X1}(i) \cdot X1\right)^2 + \left(k_y(i) \cdot y + \frac{k_b(i) \cdot b}{2} + k_{Y1}(i) \cdot Y1\right)^2 + (k_z(i) \cdot z + k_{Z1}(i) \cdot Z1)^2} \quad (2)$$

В уравнении (2) приняты следующие обозначения:
i - номер обобщённой координаты;

k_x, k_y, k_z - коэффициенты при абсолютных координатах центра платформы, принимают значение +1 или -1 в зависимости от номера обобщённой координаты в соответствии с уравнениями системы (1);

k_{X1}, k_{Y1}, k_{Z1} - коэффициенты при численных значениях размеров зоны обслуживания манипулятора $X1, Y1, Z1$ соответственно, принимающие значение 1 или 0 в зависимости от номера обобщённой координаты в соответствии с уравнениями системы (1);

k_a, k_b - коэффициенты при постоянных $\frac{a}{2}, \frac{b}{2}$

принимают значение +1 или -1 в зависимости от положения обобщённой координаты относительно центра платформы в соответствии с уравнениями системы (1).

2 Реализация системы управления манипулятором

Структурная схема блока расчёта значения обобщённой координаты манипулятора, соответствующая уравнению (2), приведена на рисунке 2, на котором приняты следующие обозначения:

ПИ - последовательный интерфейс;

ЛИ - линейный интерполятор;

P_{Lxy} - квадрат величины проекции обобщённой координаты на плоскость, соответствующую текущему положению платформы;

C - сигнал окончания очередного цикла интерполяции ЛИ.

Остальные обозначения на схеме определены выше или являются общеупотребительными.

Работа схемы начинается с загрузки с последовательного интерфейса в ЛИ заданных абсолютных

координат очередного положения центра платформы (точка М, рисунок 1). После окончания загрузки по последовательному интерфейсу передаётся команда на обработку заданного отрезка траектории. Линейный интерполятор может быть реализован по схеме, представленной в [7], где достаточно подробно описан порядок его работы. По окончании каждого шага интерполяции, означающего изменение на единицу одной или нескольких абсолютных координат x, y, z , формируется строб, который через линию задержки фиксирует результат вычисления заданной обобщённой координаты. Значение временной задержки строга принимается исходя из максимального времени прохождения информационных сигналов от входов блока до входов буферного регистра RG. Работа остальной части блока особых пояснений не требует.

Для некоторых уравнений системы (1) структурная схема, приведенная на рисунке 2, является избыточной. В частности, мультиплексор `mux1` и сумматор-вычитатель `add_sub1` для решения уравнений 1, 2, 5, 6 можно не использовать. То же самое можно сказать относительно `mux2` и `add_sub2` для уравнений 1, 4, 5, 4. Для уравнений 1, 4 можно исключить все четыре элемента. В этом случае переменные x и y подключаются к информационным входам `add_sub4` и `add_sub5` соответственно. Однако авторы считают целесообразным в случае отсутствия ограничений на аппаратную базу использование представленной структуры для всех обобщённых координат.

Проекция пары сопряжённых обобщённых координат на плоскость $xу$ совпадают по величине. Поэтому при реализации блока расчёта заданных обобщённых координат на единой платформе (ПЛИС) уравнение (2) для каждой пары сопряжённых обобщённых координат можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} P_{Lxyi} = \sqrt{\left(k_x(i) \cdot x + \frac{k_a(i) \cdot a}{2} + k_{X1}(i) \cdot X1\right)^2 + \left(k_y(i) \cdot y + \frac{k_b(i) \cdot b}{2} + k_{Y1}(i) \cdot Y1\right)^2}, \\ L_i = \sqrt{P_{Lxyi} + (Z1 - z)}, \\ L_{i+4} = \sqrt{P_{Lxyi} + z^2}. \end{cases} \quad (3)$$

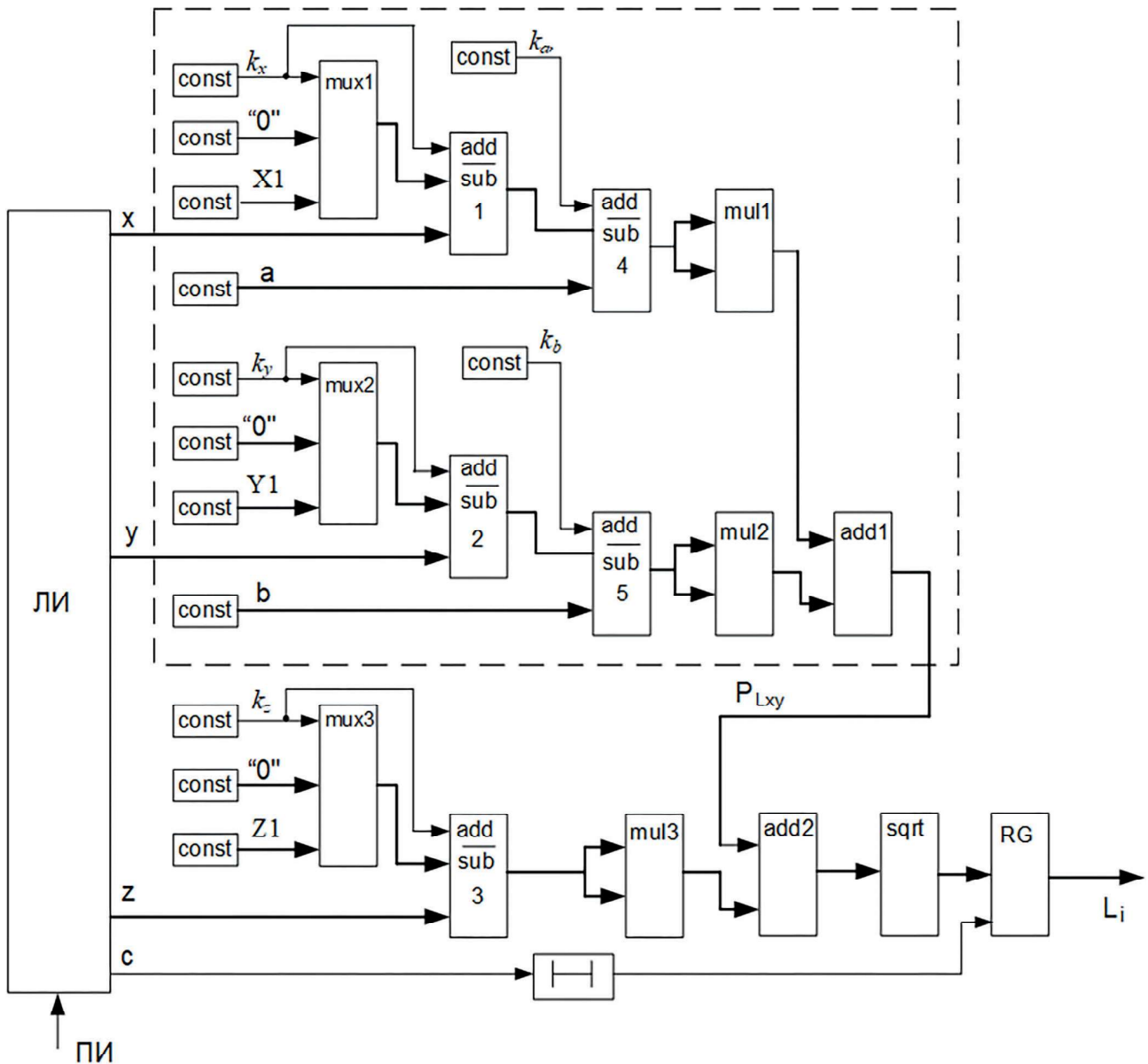


Рис. 2. Структурная схема блока расчёта заданного значения обобщённой координаты манипулятора

Все переменные системы (3) были определены выше. Здесь i может принимать значения в диапазоне от 1 до 4. Структурная схема блока расчёта значений сопряжённых обобщённых координат манипулятора, соответствующая системе уравнений (3), представлена на рисунке 3.

Блок БРП, представленный на схеме (рисунок 3), выполняет функции решателя первого уравнения системы (3) и реализован в виде части схемы, представленной на рисунке 2, заключённой в прямоугольник, выполненный штриховыми линиями.

Выводы

В работе представлено два метода расчёта заданных значений обобщённых координат при переме-

щении платформы восьмизвенного манипулятора с гибкими звеньями по траектории, заданной отрезком прямой линии, и основанных на решении обратной задачи кинематики. Предложены способы аппаратной реализации вычислителей для решения задачи расчёта значений обобщённых координат манипулятора по заданной траектории. Предложенное в работе техническое решение может быть использовано как часть аппаратной системы управления нижнего уровня восьмизвенного манипулятора с гибкими звеньями в виде тросов.

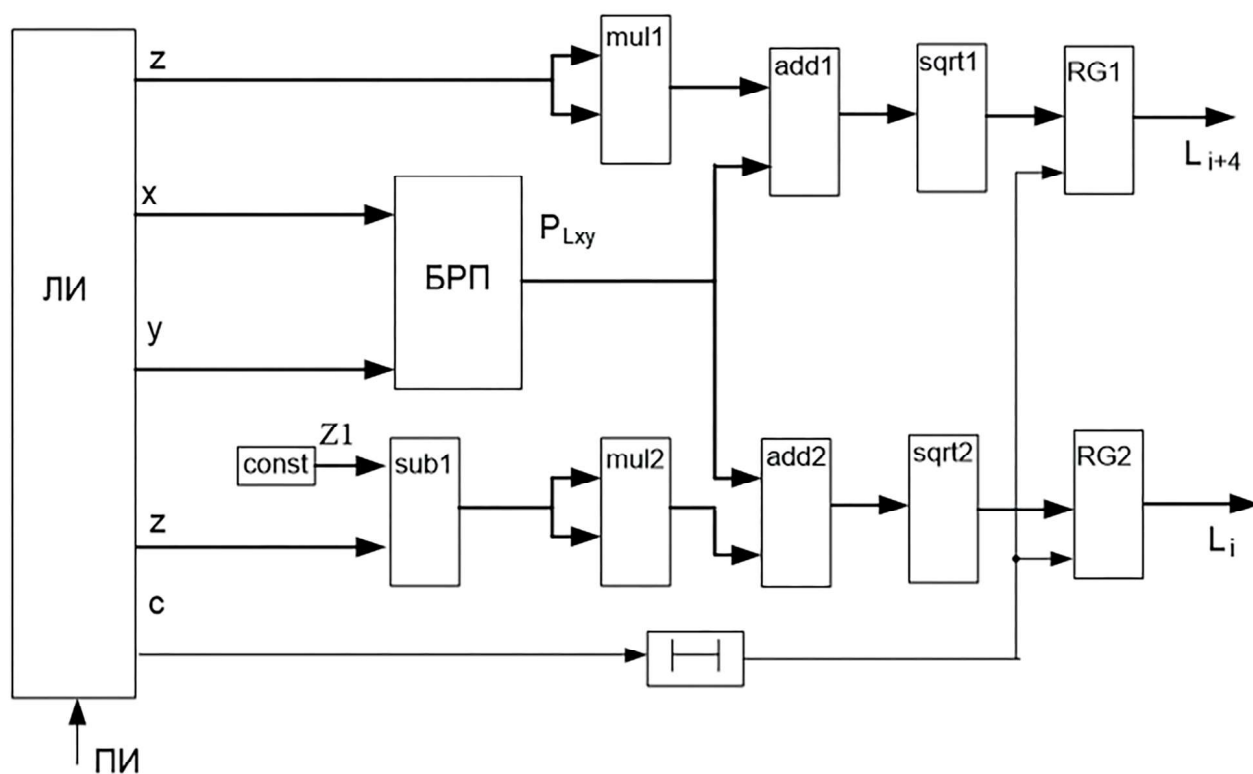


Рис. 3. Структурная схема блока расчёта заданных значений сопряжённых обобщённых координат манипулятора

Библиографический список

1. Albus J.S., Bostelman R.V., Dagalakis N.G. The NIST ROBOCRANE. A Robot Crane. Journal of Robotic Systems 1992 vol. 5. no 10.
2. Du J., Ding W., Bao H. Cable vibration analysis for large workspace cable-driven parallel manipulators. In: Cable-Driven Parallel Robots. Springer. Berlin. 2013 no 437–449.
3. Bai G., Ge Y., Sobby D., Leavitt B., Stoerger V., Kirchgessner N., Irmak S., Graef G., Schnable J., Awada T. NU-Spidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. Comput. Electron. Agric. 2019 vol. 160. no. 71–81.
4. Зеленский А.А., Подураев Ю.В., Бондарь Д.В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44–48.
5. Klimov D., Poduraev Y. Robotic flight follower system for high speed recording // Annals of DAAAM and proceedings of the international DAAAM symposium. 2015. P. 720–726.
6. Зеленский А.А., Стебулянин М.М., Абдуллин Т.Х., Харьков М.А. Реализация ускоренных вычислений прямой задачи кинематики для промышленных роботов // Вестник машиностроения. 2019. № 11. С. 28–31.
7. X. Tang, Z. Liu, Z. Shao, and L. Wang, Self-excited vibration analysis for the feed support system in fast, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014. vol. 4, no. 11, p. 63.
8. A. Zelensky, V. Dubovskov, V. Kuptsov. Investigation of the configuration of a parallel manipulator for additive manufacturing of solid structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 747, International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering» (ToPME-2019).

Зеленский Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
zelenskyaa@gmail.com

Валюкевич Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные и электротехнические системы» ФГБОУ ВО «ИСОиП (филиала) ДГТУ в г. Шахты»
val_ya@bk.ru

Алепко Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
a.alepko@stankin.ru

Дубовсков Вадим Викторович – инженер, «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
dybovskov@mail.ru

Alexander Zelensky – candidate sc. of engineering, associate professor the department «Highly treatment technologies» of MSUT «STANKIN»
zelenskyaa@gmail.com

Valyukevich Yuri Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic and Electrotechnical Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «ISOiP (branch) of DSTU in Shakhty»
val_ya@bk.ru

Alepko Andrey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics and Intelligent Digital Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education MSUT «STANKIN»
a.alepko@stankin.ru

Vadim Dubovskov – engineer «State Engineering Center» of MSUT «STANKIN»
dybovskov@mail.ru

МОДУЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА И ТАХОМАШИНЫ

A MODULE FOR MEASURING THE ANGLE AND SPEED OF MOTION OF MECHATRONIC SYSTEMS BASED ON A CONSTRUCTIVE AND ALGORITHMIC COMBINATION OF AN INDUCTION SENSOR AND A TACHOMACHINE

Рассмотрены вопросы построения измерительного устройства мехатронной системы, предназначенного для измерения угла поворота и скорости вращения объекта управления и построенного в результате конструктивной и алгоритмической интеграции индукционного датчика и тахомашины. Такое решение обеспечивает компактность интегрированного измерительного модуля, широкую полосу пропускания и высокое качество функционирования мехатронной системы в широком диапазоне значений скорости движения объекта управления.

The issues of constructing a measuring device of a mechatronic system designed to measure the rotation angle and rotation speed of a control object and built as a result of the constructive and algorithmic integration of an induction sensor and a tachomachine are considered. This solution ensures the compactness of the integrated measuring module, a wide bandwidth and high quality of the mechatronic system functioning in a wide range of values of the speed of movement of the control object.

Ключевые слова: мехатроника, интеграция, измерительная система, датчик угла, датчик скорости, синхронный тахометр.

Keywords: mechatronics, integration, measuring system, angle sensor, speed sensor, synchronous tachometer.

Введение

При разработке мехатронных систем управления движением разнообразных механических объектов появляется необходимость проектирования приводных модулей, наиболее рационально совмещающих в своей конструкции электродвигатели и датчики сигналов обратных связей. Серьёзные проблемы возникают при разработке мехатронных модулей, входящих в состав роботов и изделий специальной техники, работающих в жёстких условиях эксплуатации, например, при ударах, вибрации, низкой температуре, воздействии электромагнитных помех. К ним предъявляются повышенные требования компактности, надёжности функционирования и высокой точности и плавности перемещения объекта управления.

В ряде случаев применение выпускаемых промышленностью датчиков не позволяет построить конструкцию приводного модуля, отвечающую требованию компактности. Отказ от использования датчиков и построение системы бездатчикового управ-

ления в принципе возможны [1], но далеко не всегда приемлемы, т.к. часто не обеспечивают требуемой точности измерения и качества функционирования мехатронной системы. Есть недостатки и у известного способа получения информации о скорости движения на основании сигналов резольвера, который основан на построении электронной астатической следящей системы. Несмотря на широкое его использование в промышленных приводах [2, 3, 4, 5] и наличие микросхем обработки сигналов резольвера, такой способ не всегда даёт высокую точность измерения угла и скорости. Снижение точности особенно заметно в переходных процессах, вызванных частыми изменениями направления и интенсивности движения, характерными для робототехнических и мехатронных систем.

Поэтому при создании ряда новых мехатронных систем для удовлетворения предъявляемых к ним жёстких требований целесообразно разрабатывать индивидуальные исполнительные и измерительные элементы, учитывая допустимые габаритные размеры и

конкретные условия работы мехатронных модулей. В качестве основы измерительного устройства предлагается использовать редуктосин, который прост, надежен, компактен, удобен для встраивания в индивидуально проектируемые электромеханические системы и подходит для применения в жёстких условиях эксплуатации. Информацию об угловой скорости может дать синхронный тахогенератор. Он обладает простой конструкцией, высокой надёжностью, большой крутизной и не имеет зоны нечувствительности, что важно для построения высокоточных систем.

При этом оказывается полезной идея мехатроники, состоящая в интеграции функций датчиков угла и скорости в едином в конструктивном отношении измерительном устройстве, которое можно назвать тахометрическим редуктосином. Второй идеей, тоже характерной для мехатроники, является индивидуальный опрос нескольких обмоток многофазного датчика и последующая совместная обработка их сигналов в цифровом контроллере [7] для выявления данных о скорости и угле поворота объекта управления. Реализация этих идей даёт возможность существенно уменьшить размеры измерительного блока и при этом дать системе информацию о мгновенных значениях угла и скорости движения с необходимой высокой точностью.

1 Конструктивные особенности и алгоритмы работы тахометрического редуктосина, совмещающего функции датчика скорости и угла поворота

ЭДС, возникающие в фазных обмотках редуктосина и используемые для получения полезной информации о положении его ротора относительно статора, определяются характером изменения во времени их потокосцеплений. В общем виде с учетом ряда допущений потокосцепления Ψ_1 и Ψ_2 в фазах редуктосина, сдвинутые в пространстве на 90° , можно описать уравнениями

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= A \cdot \sin(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t), \\ \Psi_2 &= A \cdot \cos(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t).\end{aligned}\quad (1)$$

где A — амплитуда изменения потокосцеплений; t — время; $\alpha(t)$ — механический угол поворота ротора редуктосина, p — коэффициент электрической редукции, ω — круговая частота изменения сигнала возбуждения датчика.

Сигналы U_1 и U_2 , образующиеся в фазах без учета протекания по ним тока и падения напряжений на активном сопротивлении, пропорциональны производным от соответствующих потокосцеплений во времени. На основании (1) получаем уравнения

$$\begin{aligned}U_1 &= A \cdot p \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cos(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t) + A \cdot \omega \cdot \sin(\alpha(t) \cdot p) \cdot \cos(\omega \cdot t), \\ U_2 &= -A \cdot p \cdot \frac{d\alpha}{dt} \sin(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t) + A \cdot \omega \cdot \cos(\alpha(t) \cdot p) \cdot \cos(\omega \cdot t).\end{aligned}\quad (2)$$

Из уравнений (2) следует, что в фазах редуктосина наводятся две составляющие ЭДС. Одна из них пропорциональна углу поворота $\alpha(t)$ и определяется уравнениями

$$\begin{aligned}U_{11} &= A \cdot \omega \cdot \sin(\alpha(t) \cdot p) \cdot \cos(\omega \cdot t), \\ U_{21} &= A \cdot \omega \cdot \cos(\alpha(t) \cdot p) \cdot \cos(\omega \cdot t).\end{aligned}\quad (3)$$

Вторая составляющая пропорциональна угловой скорости, т.е. скорости изменения угла поворота, и описывается уравнениями

$$\begin{aligned}U_{12} &= A \cdot \Omega_{\text{эл}} \cos(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t), \\ U_{22} &= -A \cdot \Omega_{\text{эл}} \sin(\alpha(t) \cdot p) \cdot \sin(\omega \cdot t).\end{aligned}\quad (4),$$

где $\Omega_{\text{эл}} = p \cdot \frac{d\alpha}{dt}$ — электрическая скорость поворота вала.

Для качественного измерения угла необходимо, чтобы частота сигнала возбуждения значительно превосходила электрическую частоту изменения угла даже при максимальной угловой скорости. Поэтому значение частоты возбуждения обычно лежит в диапазоне от 1000 Гц до 15 000 Гц.

Амплитуды составляющих ЭДС, описываемых уравнениями (3) и (4), равны $A \cdot \omega$ и $A \cdot \Omega_{\text{эл}}$ соответственно. Фазы сигналов, определяемых уравнениями (3) и (4), смещены на 90° относительно фазы сигнала возбуждения, изменяющегося с круговой частотой ω .

Можно заметить, что в рассматриваемом измерительном устройстве интегрированы свойства датчика угла и тахометра. Понятно, что в принципе в результате преобразования сигналов можно получить сведения и о положении, и о скорости движения ротора датчика. Но одна из проблем состоит в том, что амплитуда составляющей ЭДС, несущей информацию о скорости, пропорциональна этой скорости и может оказаться слишком малой для уверенного получения информации о скорости движения ротора индуктосина на фоне шумов и более сильной составляющей ЭДС, определяемой положением ротора датчика.

Для увеличения сигнала, несущего информацию о скорости, предлагается изменить конструкцию редуктосина, разместив между зубцами его ротора постоянные магниты. Схема, поясняющая конструктивные особенности предлагаемого тахометрического редуктосина, представлена на рисунке 1.

Как показано на рисунке 1, число зубцов ротора равно 18. Следовательно, коэффициент электрической редукции датчика угла тоже равен 18. При размещении между зубцами ротора магнитов коэффициент редукции тахометрического сигнала будет равен 9, то есть в 2 раза меньше. При этом магниты не нарушают функционирование редуктосина как измерителя угла поворота, так как их магнитная проницаемость для поля возбуждения редуктосина близка к единице и примерно соответствует магнитной проницаемости воздуха. Замыкание магнитных потоков от

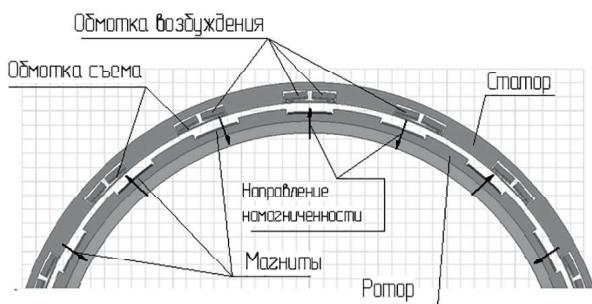


Рис. 1. Схема предлагаемого тахометрического редуктосина

сильных постоянных магнитов происходит через зубцы статора и ротора датчика угла. При проектировании тахометрического редуктосина важно обеспечить отсутствие значительного магнитного насыщения материалов. Это достигается, в частности, тем, что, как показано на рисунке 1, высота магнитов на роторе составляет всего 2,5 мм.

В обмотках статора тахометрического редуктосина наводятся как сигналы, пропорциональные угловой скорости, так и сигналы, пропорциональные углу поворота. Возможно разделение сигналов с помощью аналоговых или цифровых фильтров, но данный подход может быть эффективен только для низкоскоростных устройств, частота скоростного сигнала в которых многократно ниже частоты возбуждения. Преимуществом предлагаемого устройства является возможность изначального разделения сигналов, для чего устройство спроектировано таким образом, что содержит в единой конструкции четырёхфазный датчик угла и восьмифазный тахометр. Отметим, что для измерения сигналов скорости и угла, необходимо и достаточно двух фаз, сдвинутых на 90 градусов. Увеличение числа фаз в измерительной системе возможно, но не обязательно. При этом симметричная четырёхфазная система фактически приводится к двухфазной перевернутом фаз, то есть в четырех фазной системе помимо фаз А, В присутствуют также фазы – А, – В, что в принципе не дает новой информации. А в восьмифазной системе действуют две четырехфазные группы, сдвинутые друг относительно друга на 45 электрических градусов. Так как для измерения угла нужны только две фазы, то можно восьмифазную систему привести к двум фазам сложением векторов, сдвинутых друг относительно друга под углом 45 градусов. Таким образом увеличение числа фаз позволяет значительно повысить качество разделения сигналов тахометра и датчика угла, при этом фильтры также используются но являются не основным а дополнительным методом, повышающим качество функционирования устройства.

Особенность построения тахометрического редуктосина состоит в индивидуальном контроле и

обработке сигналов фаз. Сигнал с обмотки съема каждой секции опрашивается многоканальным АЦП независимо от других фаз, а соответствующий ему цифровой код совместно с цифровыми кодами других сигналов используется в микроконтроллере мехатронной системы для выделения информации о скорости и угле поворота ротора.

В предлагаемой конструкции датчика количество зубцов статора равно 16, при этом количество секций равно 8 как для тахометра, так и для датчика угла. Для тахометра число зубцов в фазной группе $k = 2$. Таким образом, число секций съема равно 8. Для редуктосина также сигналы двух зубцов объединяются в одну секцию съема, что соответствует принципам функционирования редуктосина. В таблице 1 приведены обозначения сигналов в восьми секциях съема сигналов, наводимых из-за совмещения в одном устройстве разных датчиков.

В таблице 1 фазы «Адат» и «Вдат» содержат сигналы фаз четырёхфазного датчика угла, а фазы «А1тах», «В1тах», «А2тах», «В2тах» сигналы фаз восьмифазного тахометра. Как показано в таблице 2, сигналы, получаемые из восьми секций съема, содержат суперпозицию сигналов датчика угла и тахометра.

Цифровые коды сигналов, возникающих на обмотках съема, передаются в микроконтроллер для дальнейшей обработки. В нём они подвергаются преобразованиям с целью формирования сигналов двух фаз датчика угла и двух фаз тахометра. Представленные ниже уравнения (16) – (19) описывают эти преобразования.

$$\begin{aligned}
 F1 &= Vs1+Vs2+Vs3+Vs4-Vs5-Vs6-Vs7-Vs8= \\
 &= Адат+А1тах+Вдат+А2тах-Адат+В1тах-Вдат+В2тах- \\
 &Адат+А1тах-Вдат+А2тах+Адат+В1тах+Вдат+В2тах = \\
 &= 2 \cdot А1тах + 2 \cdot А2тах+2 \cdot В1тах+2 \cdot В2тах= \\
 &=2 \cdot (А1тах+А2тах+В1тах+В2тах)=FАтах.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 F2 &= Vs1+Vs2-Vs3-Vs4-Vs5-Vs6+Vs7+Vs8= \\
 &= Адат+А1тах+Вдат+А2тах+Адат-В1тах+Вдат-В2тах- \\
 &Адат+А1тах-Вдат+А2тах-Адат-В1тах-Вдат-В2тах = \\
 &= 2 \cdot А1тах + 2 \cdot А2тах-2 \cdot В1тах-2 \cdot В2тах= \\
 &=2 \cdot (А1тах+А2тах-В1тах-В2тах)=FВтах.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 F3 &= Vs1+Vs2-Vs3-Vs4+Vs5+Vs6-Vs7-Vs8= \\
 &= Адат+А1тах+Вдат+А2тах+Адат-В1тах+Вдат-В2тах+ \\
 &Адат-А1тах+Вдат-А2тах+Адат+В1тах+Вдат+В2тах \\
 &4 \cdot Адат+4 \cdot Вдат=FХдат.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 F4 &= Vs1-Vs2-Vs3+Vs4+Vs5-Vs6-Vs7+Vs8= \\
 &= Адат+А1тах-Вдат-А2тах+Адат-В1тах-Вдат+В2тах+ \\
 &Адат-А1тах-Вдат+А2тах+Адат+В1тах-Вдат-В2тах \\
 &4 \cdot Адат-4 \cdot Вдат=FУдат.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Таблица 1. Обозначения сигналов датчика и тахометра в секциях

Фазы	Секция 1	Секция 2	Секция 3	Секция 4	Секция 5	Секция 6	Секция 7	Секция 8
Фазы датчика	Адат	Вдат	-Адат	-Вдат	Адат	Вдат	-Адат	-Вдат
Фазы тахометра	А1тах	А2тах	В1тах	В2тах	-А1тах	-А2тах	-В1тах	-В2тах

Таблица 2. Сигналы в секциях съёма

Секция 1	Секция 2	Секция 3	Секция 4	Секция 5	Секция 6	Секция 7	Секция 8
Vs1=Адат+ А1тах	Vs2=Вдат+ А2тах	Vs3=-Адат+ В1тах	Vs4=-Вдат+ В2тах	Vs5=Адат- А1тах	Vs6=Вдат- А2тах	Vs7=-Адат- В1тах	Vs8=-Вдат- В2тах

Описанные преобразования, выполняемые в цифровом контроллере, создают два независимых выхода интегрированного датчика. На одном из них присутствуют сигналы, содержащие информацию о скорости, а на втором — сигналы об угле поворота. Результаты преобразований «F1» и «F2» можно рассматривать как новые фазные сигналы, которые содержат комбинацию сигналов тахометра «FАтах» и «FВтах» соответственно без примеси сигналов датчика угла. При этом сдвиг фаз между сигналами «F1» и «F2» составляет 90°. По ним могут быть определена угловая скорость. Полученные в результате преобразований новые фазные сигналы «F3» и «F4» содержат комбинацию сигналов датчиков угла без примеси сигналов тахометра и служат для вычисления угла поворота. Таким образом, выражения (5)... (8) позволяют решить задачу формирования в вычислительной системе данных, на основании которых может производиться определение значений угла поворота и угловой скорости.

2 Результаты компьютерного моделирования тахометрического редуктосина и алгоритмы коррекции

Функционирование предлагаемого тахометрического редуктосина, конструктивная схема которого представлена на рисунке 1, было проверено на его компьютерной модели, сформированной с помощью пакета расчета электромагнитных полей. На рисунке 2 показаны сигналы, образующиеся в секциях съёма (8 штук). Для лучшего восприятия характера их изменения сигнал одной секции выделен более ярко.

Скорость вращения ротора при моделировании составляла 220 об/мин. Частота возбуждения датчика была принята равной 1000 Гц. Ток возбуждения подобран таким, чтобы уровни сигналов датчика угла и тахометра были сопоставимы для более удобного дальнейшего анализа особенностей их разделения.

На рисунке 2 видно, что сигнал тахометра модулирован высокочастотным сигналом с обмотки датчика угла, что полностью соответствует теории. Сигналы фаз тахометра, вычисленные по формулам (5) и (6), показаны на рисунке 3.

Видно, что сигналы фаз тахометра, как и требуется, сдвинуты на 90 электрических градусов. Но модель показывает, что полного уничтожения сигналов индукционного датчика не происходит. По сравнению с сигналами, показанными на рисунке 2, сигналы датчика угла многократно уменьшены, но еще заметны. Для дальнейшего уменьшения влияния сигналов датчика на сигналы тахометра целесообразно применение фильтра нижних частот. Сигналы датчика угла, вычисленные по формулам (7) и (8) представлены на рисунке 4.

Как и ожидалось, преобразованные сигналы соответствуют сигналам обычного двухфазного датчика. Для более четкого изображения сигнал одной из фаз показан более ярко. Сдвиг фаз составляет 90 электрических градусов. Проникновение тахометрической составляющей в сигналы датчика угла, как и предполагалось, минимально. Но при необходимости дополнительного его снижения возможно применение фильтра.

Получение информации об угловой скорости на основании величин F1 и F2, вычисленных по формулам (5) и (6) и показанных на рисунке 3, имеет особенности. Величины F1 и F2 позволяют определить абсолютное значение угловой скорости V_TAX по формуле

$$V_TAX = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}. \quad (9)$$

Получить знак скорости непосредственно из сигналов фаз датчика угла не удастся, так как коэффициент редукции датчика угла в два раза больше коэффициента редукции тахометра. Его можно

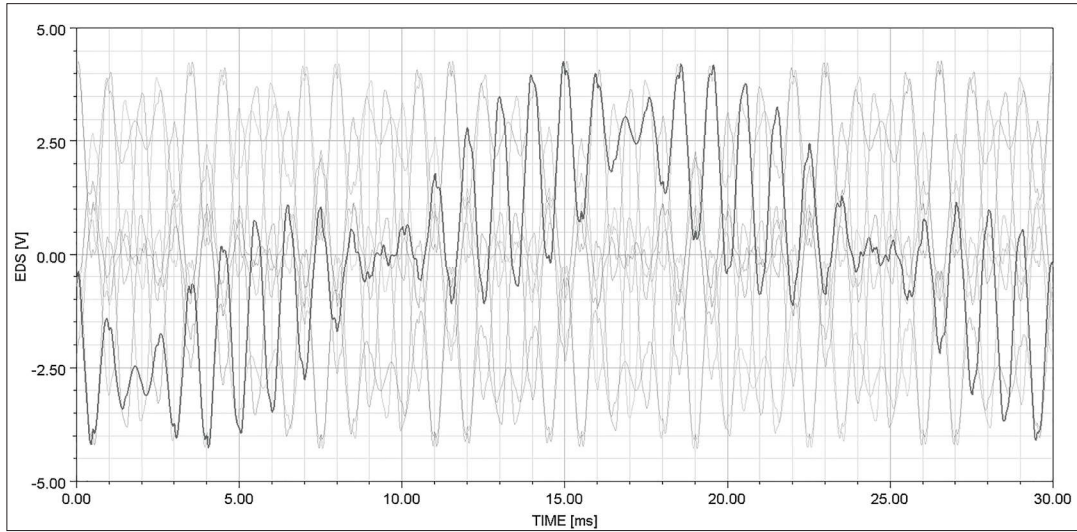


Рис. 2. Вид сигналов в секциях съёма

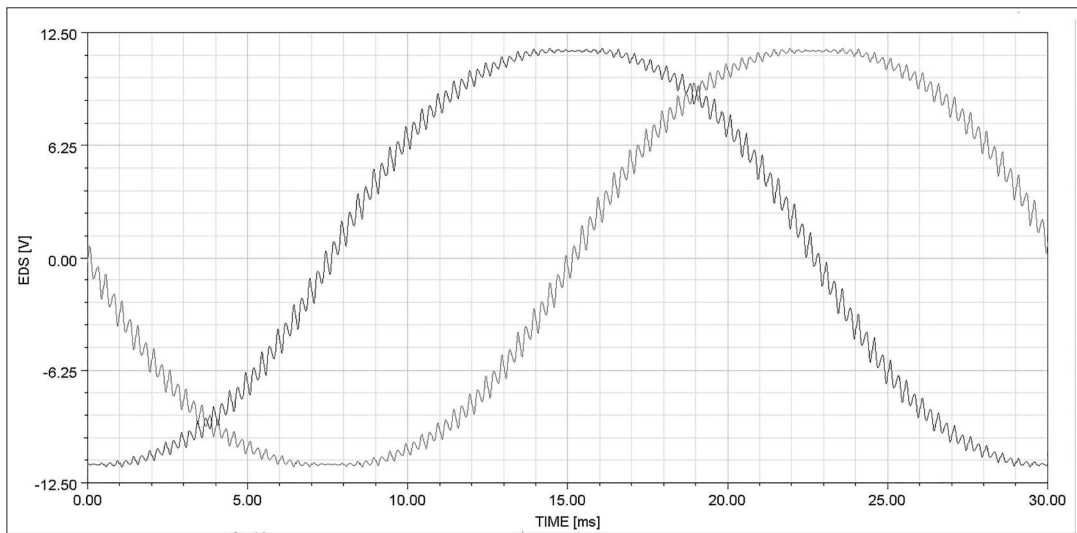


Рис. 3. Сигналы фаз тахометра

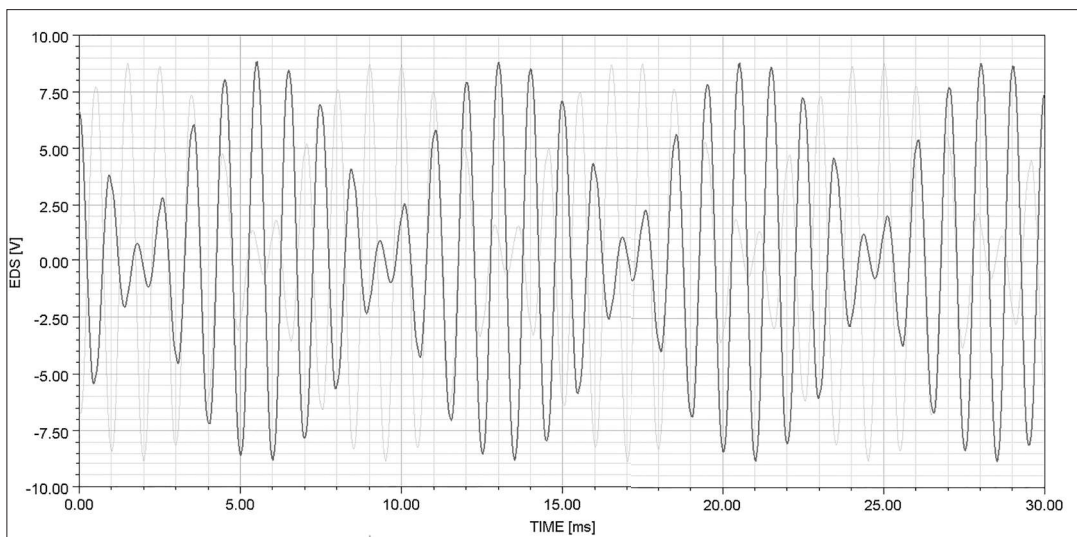


Рис. 4. Сигналы датчика угла

определить либо дифференцируя выходные сигналы датчика угла, либо обрабатывая их по известному методу получения цифрового кода с помощью следящей системы. Предлагаемый вариант построения тахометрического редуктосина имеет преимущество, состоящее в том, что дифференцирование сигналов датчика угла необходимо только для определения знака, и это повышает точность измерения угловой скорости. Далее рассмотрим модификацию метода получения информации о скорости на основании формулы (9), позволяющую повысить точность измерения скорости.

При использовании преобразования (9) получена оценка абсолютного значения скорости, показанная на рисунке 5.

Как видно на рисунке 5, сигнал, несущий информацию об абсолютном значении скорости, имеет значительные колебания. Поэтому использование такого сигнала непосредственно для замыкания контура регулирования скорости в следящем приводе будет приводить к снижению качества его функционирования. Для повышения точности вычисления скорости разработан алгоритм, реализуемый в контроллере мехатронной системы.

После определения V_TAX вычисляются представленные на рисунке 6 корректирующие сигналы FA_TAX_M , FB_TAX_M .

$$F_TAX_M = \frac{FA_TAX}{V_TAX}, \quad (10)$$

$$FB_TAX_M = \frac{FB_TAX}{V_TAX}.$$

Величина, используемая для коррекции скорости, вычисляется по формуле

$$V_TAX_M = \sqrt{(FA_TAX \cdot 0,55 \cdot FA_TAX_M)^2 + (FB_TAX \cdot 0,55 \cdot FB_TAX_M)^2} \quad (10)$$

Итоговый сигнал, дающий более точную информацию об абсолютном значении скорости, вычисляется по формуле

$$V_TAX_M2 = \frac{V_TAX + V_TAX_M}{2} \quad (11)$$

Вид сигналов V_TAX , V_TAX_M , V_TAX_M2 показан на рисунке 7, из которого следует, что использование алгоритма коррекции увеличивает точность определения скорости, многократно уменьшая колебания её оценки. Преимуществом решения, предложенного в данной работе, является получение истинного сигнала скорости в любых режимах движения без запаздывания и динамических искажений.

На рисунке 8 представлены выпрямленные сигналы датчика угла, на основе которых вычисляется угол поворота ротора относительно статора.

При введении алгоритмической коррекции сиг-

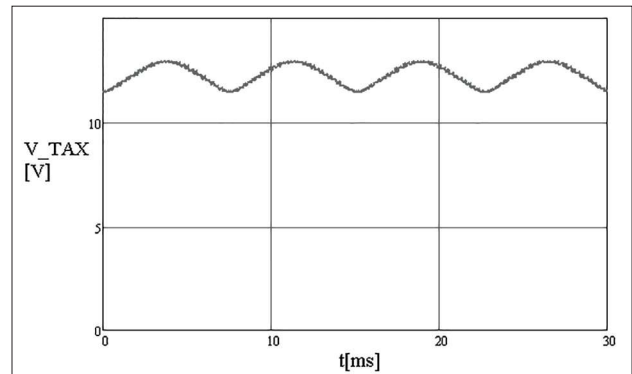


Рис. 5. Оценка абсолютного значения скорости

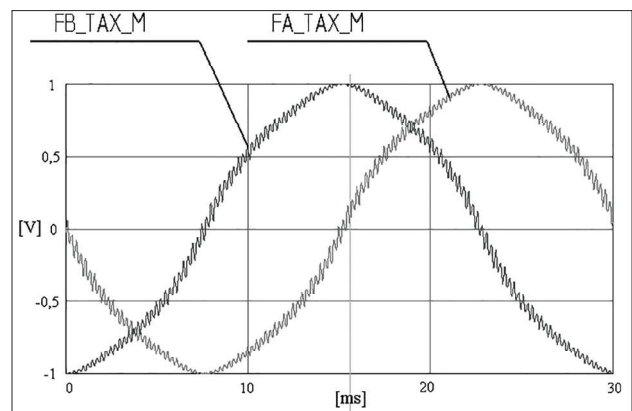


Рис. 6. Корректирующие сигналы

налов фаз погрешность датчика составляет менее двух угловых минут.

Выводы

Совокупность конструктивных решений и алгоритмов преобразования и коррекции сигналов нового измерительного устройства интегрального типа, названного в статье тахометрическим редуктосином, позволяет добиться снижения габаритных размеров и массы этого устройства примерно в два раза, что важно для создания компактных мехатронных приводных модулей.

Положительный эффект достигается в результате интеграции в одном измерительном устройстве свойств датчика угла поворота и датчика угловой скорости, а также в результате эффективного преобразования сигналов, позволяющего выделить величины, несущие информацию о скорости и угле поворота.

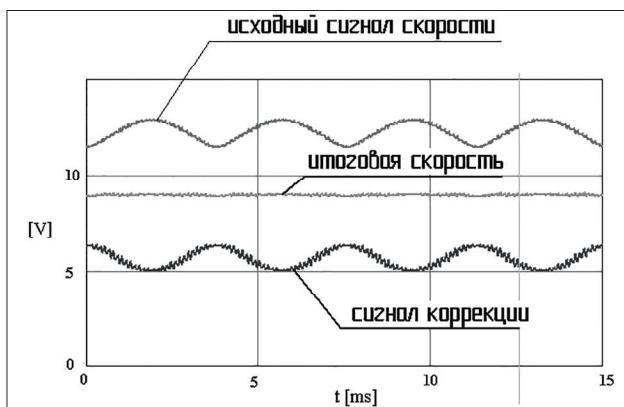


Рис. 7. Вид сигналов V_TAX, V_TAX_M, V_TAX_M2

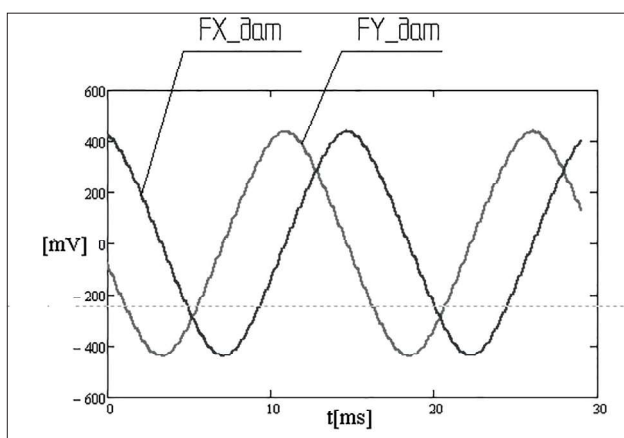


Рис. 8. Сигналы датчика угла

Совместное применение индивидуально разработанных электромеханических измерителей, с введением разделения секций обмоток, и использование компьютерного управления для комбинации сигналов и вычисления сигналов скорости и угла позволяет рассматривать данный датчик как мехатронное устройство.

Предложенный алгоритм получения сигналов скорости, не использующий непосредственно сигналы датчика угла, повышает точность измерения скорости. Преимуществом предложенного метода перед известным методом получения скорости из обработки дат-

чика угла с помощью построения следящей цифровой системы является более высокая точность оценки скорости в переходных режимах, а также отсутствие влияния погрешности датчика угла на сигнал скорости.

Описанный в статье тахометрический редуктосин рекомендуется для использования в быстродействующих приводах роботов, мехатронных устройств и изделиях специальной техники, функционирующих в жестких условиях эксплуатации и в режимах работы, которые требуют частой смены разгона и торможения, и при достаточно высокой требуемой точности позиционирования.

Библиографический список

1. Дианов А.Н. Разработка и исследование системы бездатчикового управления вентиляльным двигателем: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 — Москва., 2004. — 200 с.
2. Смирнов Ю.С. Многокомпонентные аналого-цифровые преобразователи перемещений с синусно-косинусными датчиками. //Измерительная техника № 4, 1991 г.
3. Ипполитова Е.В. Повышение точности систем наведения за счет совершенствования алгоритмов обработки сигналов датчика обратной связи индукционного типа: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 — Москва., 2013. — 129 с.
4. Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Гибридный преобразователь сельсин-код с большими интегральными схемами. / С. Лэнтон. // Электроника. Том 54, № 13 (618), 30 июня 1981 г.
6. А. с. 591768 (СССР) Устройство для измерения скорости вращения / Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин, В.Н. Бродовский, В.А. Белоцерковский. Оpubл. в Б.И., 1978, № 5.
7. Баранов М.В., Илюхин Ю.В., Корчагин О.А. Мехатронные трёхотсчётные датчики положения на основе редуктосинов для прецизионных приводных модулей индивидуального исполнения // Вестник МГТУ «Станкин», № 2 (53), 2020. — С. 73–82.

Баранов Михаил Васильевич — канд. техн. наук, генеральный директор и главный конструктор ООО НПФ «Политех»
 info@npf-polytech.ru

Илюхин Юрий Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
 ilyv-2@mail.ru

Корчагин Олег Александрович — зам. главного конструктора ООО НПФ «Политех»
 koroleg@inbox.ru

Baranov Mikhail Vasilievich – Candidate of Engineering Sciences, General Director and Chief Designer of
OOO NPF «Polytech»

info@npf-polytech.ru

Ilyukhin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc. in Engineering, Professor of department of Robotics and Mechatronics,
MSUT «STANKIN»

ilyv-2@mail.ru

Korchagin Oleg Alexandrovich – deputy chief designer of OOO NPF «Polytech»

koroleg@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПОРТАТИВНОГО РОБОТА MEARM НА ПЛАТФОРМЕ ARDUINO В ДЕКАРТОВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

STUDY OF POSSIBILITY OF PROGRAMMING FOR PORTABLE ROBOT-ARM MEARM ON ARDUINO PLATFORM IN CARTESIAN COORDINATES

В статье исследуется возможность программирования портативного робота-манипулятора MeArm с управлением от микроконтроллера Arduino в декартовой системе координат. Рассматривается как ручной способ управления роботом, так и автоматический цикл работы.

A possibility of programming for portable robot-arm MeArm with Arduino control in Cartesian coordinate system is studied in this article. Manual and automatic control modes are researched. The study is illustrated by a lot of examples.

Ключевые слова: образовательная робототехника, Arduino.

Keywords: educational robotics, Arduino.

Arduino — наиболее популярная программно-аппаратная платформа для обучения техническому творчеству, созданию различных моделей, в том числе в области робототехники [1]. На рынке имеется множество готовых решений в области учебных мини-роботов, комплектов по созданию умного дома, интернета вещей и пр. [2, 3]. А самой популярной моделью робота-манипулятора на базе Arduino является модель MeArm [4]. Ее используют во многих учебных и любительских проектах [5, 6, 7].

Портативный робот MeArm (см. рис. 1) оснащен четырьмя серводвигателями MG90S, реализующими три угловые степени подвижности и работу схвата. Ручное управление роботом (серводвигателями) осуществляется с помощью потенциометров. Также есть возможность реализации алгоритма «обучения» робота и работы по автоматическому циклу. Принципиальная схема системы управления манипулятором на базе платы Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328 показана на рис. 2. Плата расширения Arduino UNO ProtoShield с элементами управления показана на рис. 3.

В данной статье исследуется возможность разработки системы управления роботом MeArm в декартовой системе координат.

Использование серводвигателей MG90S в качестве приводов для робота MeArm позволяет легко реализовывать угловые перемещения с погрешностью порядка 1°. Таким образом, естественное управление

роботом (программное или ручное) осуществляется в угловой системе координат:

- φ — поворот руки (servo1);
- α_1 — наклон стойки (servo2);
- α_2 — подъем/опускание стойки с рукой (servo3);

Двигатели MG90S при питании непосредственно от платы Arduino UNO (5В) дают максимальный крутящий момент около 200 Н мм, что с учетом длин звеньев манипулятора, а также собственного веса деталей, обеспечивают грузоподъемность около 100 граммов.

Робот MeArm имеет приводы небольшой мощности, а его конструкция обладает недостаточно высокой жесткостью. Движения манипулятора зачастую происходят с рывками. Экспериментально установлено, что плавность движений может быть достигнута, если на сервоприводы подавать сигналы с медленно изменяющимися значениями углов, при этом выдерживая между каждым малым перемещением небольшие паузы (порядка 5..20 мс).

Манипулятор вполне способен справиться с простейшими функциями, такими как позиционирование, захват, перенос, опускание легких объектов и подходит для обучения школьников и студентов основам робототехники.

Более интересным представляется возможность превратить манипулятор в робота-чертежника, который, удерживая в хвате маркер, способен по

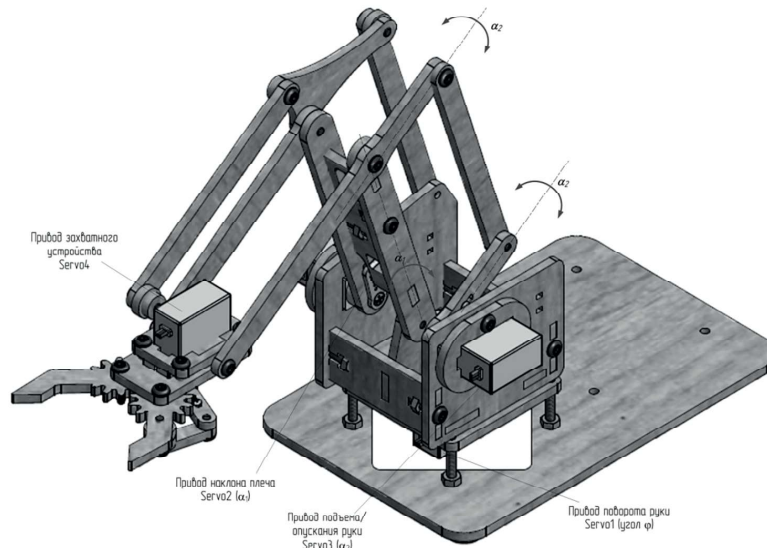


Рис. 1 – Конструкция механической части мини-робота MeArm с сервоприводами и управлением от Arduino

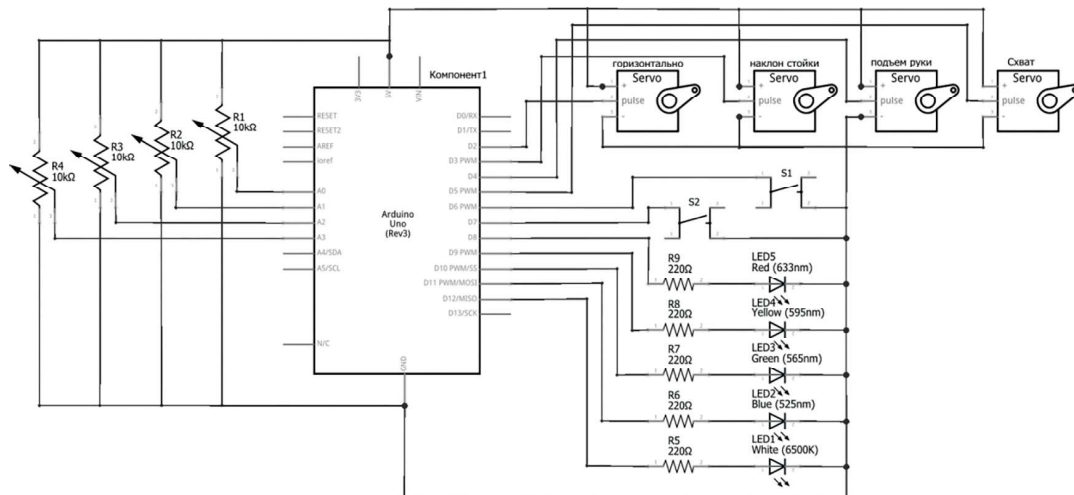


Рис. 2 – Система управления роботом MeArm на базе Arduino UNO R3

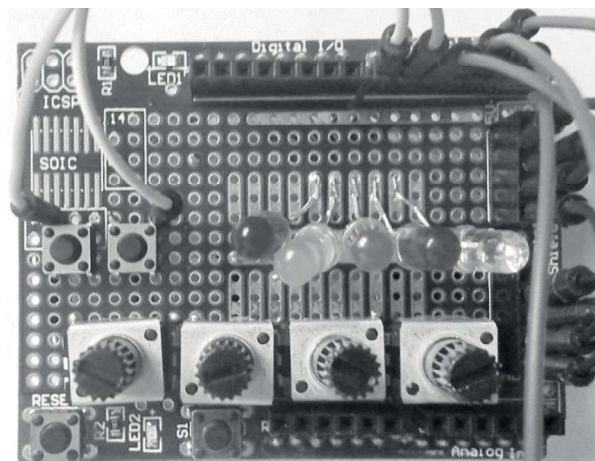


Рис. 3 – Пульт ручного управления роботом MeArm, выполненный на плате Prototype Shield

массивам координат точек вычерчивать различные фигуры. Однако для удобства задания точек вычерчиваемых фигур необходимо преобразовать систему управления манипулятором из угловой в декартову.

Рассмотрим геометрическое решение этой задачи.

На рис. 4 представлена упрощенная кинематическая схема манипулятора MeArm и показаны связи между декартовыми координатами X, Y, Z и угловыми координатами $\varphi, \alpha_1, \alpha_2$. Верхние тяги манипулятора (на рис. 4 не показаны) обеспечивают лишь сохранение горизонтального положения для звена L_3 и соответственно вертикального положения для звена L_4 (маркера).

Таким образом, зная углы поворота звеньев манипулятора $\varphi, \alpha_1, \alpha_2$ найти значения координат положения кончика маркера X, Y, Z несложно. Для этого используются уравнения

$$R_1 = L_2 \sin(\alpha_2) - L_1 \cos(\alpha_1); \tag{1}$$

$$Z_1 = L_1 \sin(\alpha_1) - L_2 \cos(\alpha_2); \tag{2}$$

$$R = R_1 + L_3 + L_5; \tag{3}$$

$$X = R \cos(\varphi); \tag{4}$$

$$Y = R \sin(\varphi); \tag{5}$$

$$Z = Z_1 - L_4 + L_6. \tag{6}$$

Преобразование декартовых координат X, Y, Z в угловые координаты $\varphi, \alpha_1, \alpha_2$ выполнить несколько сложнее.

Сначала рассчитаем

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}; \tag{7}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right); \tag{8}$$

$$R_1 = R - L_3 - L_5; \tag{9}$$

$$Z_1 = Z + L_4 - L_6. \tag{10}$$

Однако найти неизвестные углы α_1, α_2 из уравнений (1) и (2) методами, доступными для простого программирования на языке C++ в Arduino IDE не просто.

Решим эту задачу по-другому. Для этого рассмотрим рисунок 5.

Для $\triangle OCB$ выразим угол α_3 и R_3

$$\alpha_3 = \arcsin\left(\frac{Z_1}{R_3}\right). \tag{11}$$

$$R_3 = \sqrt{Z_1^2 + R_1^2}. \tag{12}$$

Для $\triangle OAB$ по теореме косинусов можно выразить угол α_4

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + R_3^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot R_3}\right). \tag{13}$$

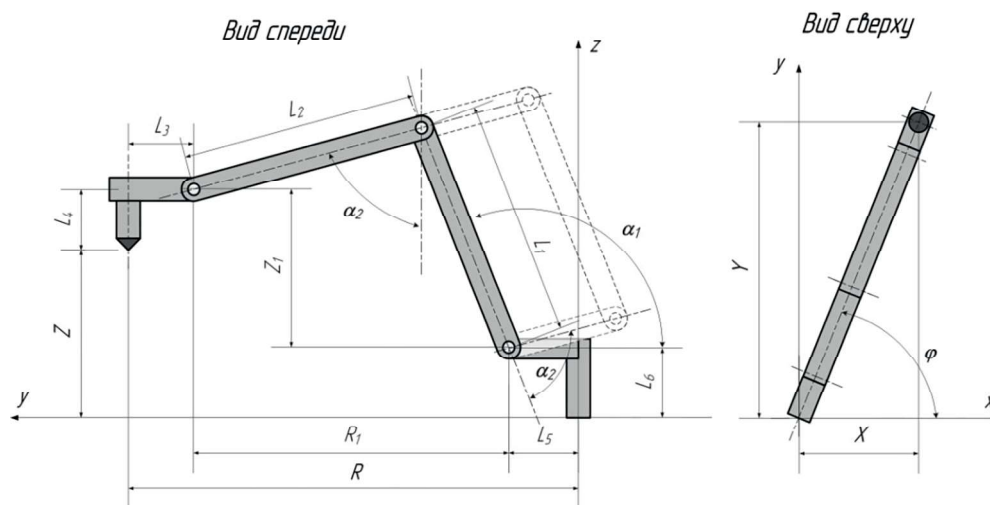
Из рис. 5 угол α_1 можно выразить как:

$$\alpha_1 = 180^\circ - \alpha_3 - \alpha_4. \tag{14}$$

Оставшийся угол α_2 можно найти, подставив значение угла α_1 в уравнение (2):

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{L_1 \cdot \sin(\alpha_1) - Z_1}{L_2}\right). \tag{15}$$

Используя выведенные зависимости (7) – (15), можно запрограммировать ручное управление мани-



$L_1 = 80 \text{ мм}; L_2 = 80 \text{ мм}; L_3 = 50 \text{ мм}; L_4 = 30 \text{ мм}; L_5 = 20; L_6 = 20; \varphi = 0 \dots 180^\circ; \alpha_1 = 30 \dots 150^\circ; \alpha_2 = 30 \dots 150^\circ$

Рис. 4 – Упрощенная кинематическая схема манипулятора

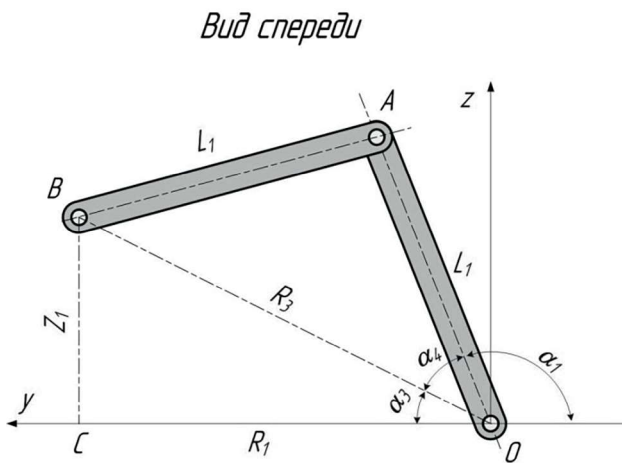


Рис. 5 – Геометрические построения для нахождения угла α_1

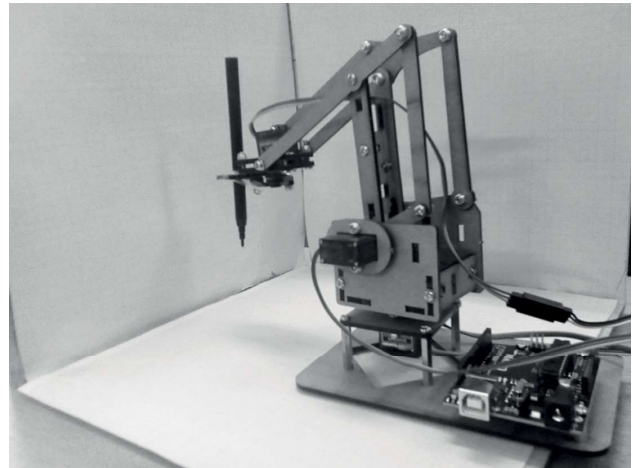


Рис. 6 – Робот MeArm с маркером на чертежном стенде

пулятором посредством потенциометров, каждый из которых будет настроен на обеспечение движения маркера (в схвате) по каждой из координат X, Y, Z .

Апробация программы управления роботом в декартовой системе координат осуществлялась на чертежном стенде, состоящем из трех взаимно-перпендикулярных плоскостей (см. рис. 6). Маркер закреплялся в схвате манипулятора. Задача оператора заключалась в вычерчивании прямоугольника на каждой из плоскостей: горизонтальной XU и вертикальных XZ и YZ).

Проведённые эксперименты показали, что полученные реальные траектории движения вдоль координат X, Y, Z (см. рис. 7) далеки от идеальных:

- присутствуют рывки от дискретных поворотов приводов на 1° , которые при увеличении радиуса R дают существенные искажения;
- перпендикулярность движений вдоль осей сохраняется только в небольшой окрестности возле плоскости YZ ;
- при отходе от главной плоскости YZ появляется кривизна траекторий движений вдоль каждой осей.

Далее проводился анализ траекторий, получаемых по автоматически запрограммированному в декартовых координатах циклу.

Действительно, если в программу управления заранее задать массив декартовых координат $X\{\}, Y\}, Z\}$, которые представляют собой точки некоторого чертежа или рисунка, то по формулам (7) – (15) можно легко их пересчитать в массивы угловых координат $\varphi\{\}, \alpha_1\{\}, \alpha_2\{\}$ для автоматического управления сервоприводами. Однако, так как движение по координате X, Y или Z реализуется одновременными движениями по двум или сразу трем координатам $\varphi, \alpha_1, \alpha_2$, то функция управления каждым таким перемещением должна быть реализована через циклы микроперемещений.

Массивы $X\{\}, Y\}, Z\}$ для рисунков удобнее задавать в некоей локальной системе координат, нулем которой можно выбрать произвольную точку касания кончиком маркера листа при ручном управлении манипулятором. При этом оператор, используя для управления потенциометры, «подводит» в любую доступную точку закрепленный на манипуляторе маркер и нажимает кнопку «Пуск». Система управления считывает показания потенциометров (или углов поворота сервоприводов), рассчитывает по формулам (1) – (6) положение этого нуля координат (X_0, Y_0, Z_0) и автоматически прибавляет эти значения к элементам соответствующих массивов $X\{\}, Y\}, Z\}$. Далее по формулам (7) – (15) массивы декартовых координат $X\{\}, Y\}, Z\}$ пересчитываются в массивы угловых координат $\varphi\{\}, \alpha_1\{\}, \alpha_2\{\}$, которые и обрабатываются в автоматическом цикле управления сервоприводами манипулятора.

На рисунках 8–9 показаны некоторые пробные рисунки, выполненные таким роботом-чертежником.

Приведенные в статье формулы позволяют запрограммировать робот MeArm не только в декартовой X, Y, Z , но и в цилиндрической системе координат R, φ, Z .

Невысокая точность полученных линейных траекторий движения (и, соответственно, низкое качество рисунков) обусловлена низкой жесткостью механической части манипулятора, наличием люфтов между деталями, малой мощностью приводов и дискретностью серводвигателей в 1° (при использовании стандартной библиотеки для работы с сервоприводами «Servo.h» [1]), а также геометрическим упрощением кинематики манипулятора.

Автор полагает, что более высокая точность может быть достигнута в результате использования более жесткой металлической конструкции манипулятора, применения более мощных и точных приводов. В частности, представляются целесообразными замена

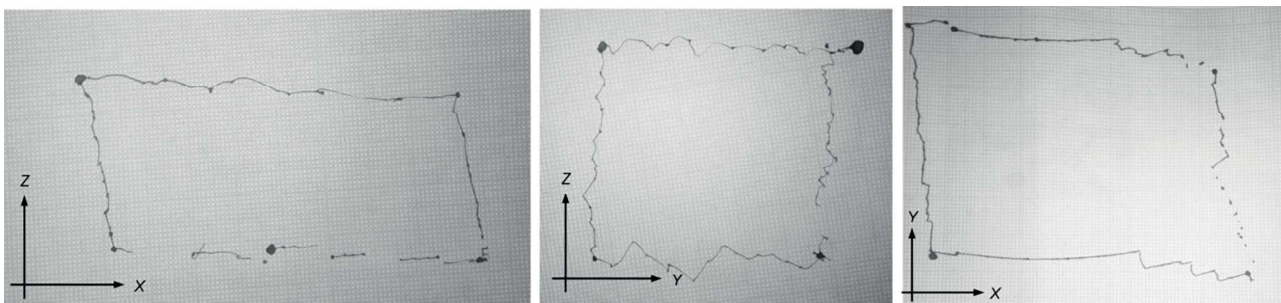


Рис. 7 – Линейные перемещения маркера в схвате робота при ручном управлении по координатам X, Y, Z в разных плоскостях

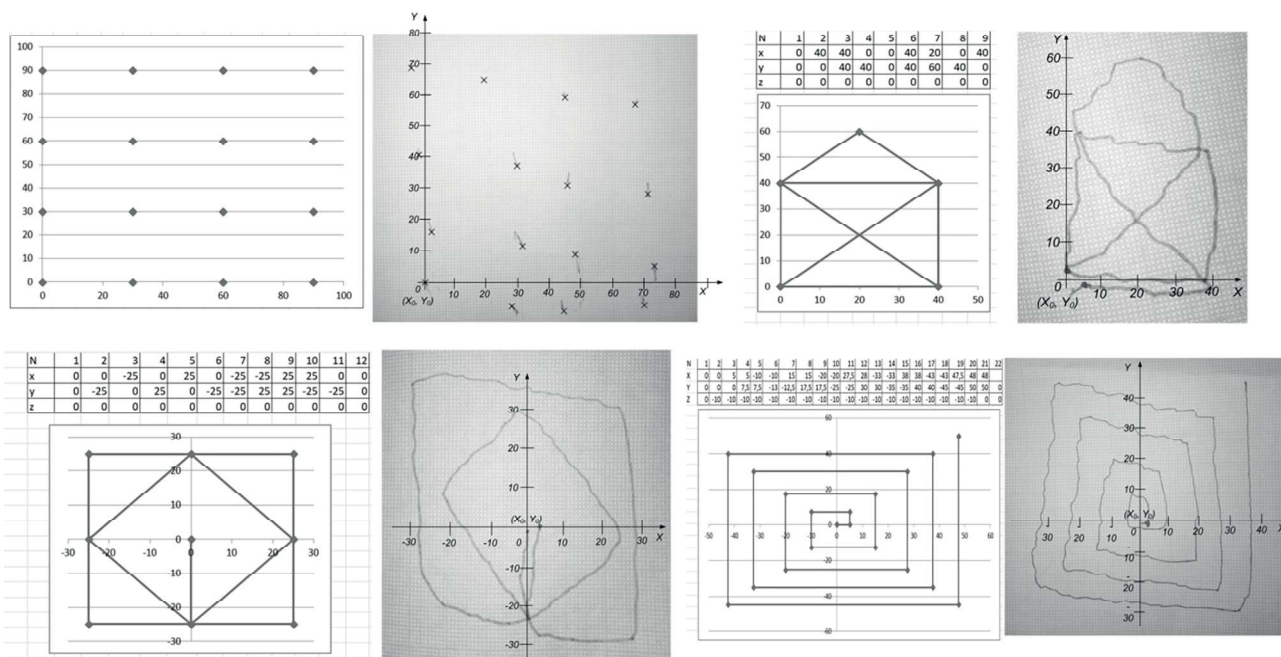


Рис. 8 – Фигуры, вычерченные роботом по массивам точек

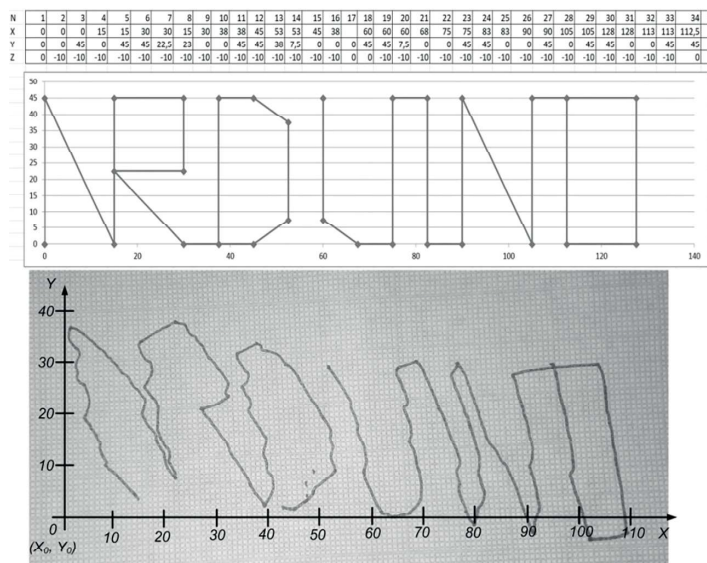


Рис. 9 – Надпись «ARDUINO»

MG90S на MG996 или замена серводвигателей на шаговые двигатели, дискретность которых измеряется десятными и даже сотыми долями угловых градусов, а также доработка модели кинематики для учета небольшого наклона схвата и маркера.

Не предъявляя же высоких требований к качеству рисунков, получаемых с помощью робота, можно утверждать, что программирование в декартовых координатах робота MeArm и подобных ему роботов, предназначенных для использования в образовательных и любительских проектах все же возможно.

Библиографический список

1. Arduino [Electronic resource] // Arduino: [site]. — 2020. — URL: <https://www.arduino.cc/> (Дата обращения: 04.11.2020)
2. **Варлашин В.В.** Методика преподавания робототехники на базе платформы Arduino в рамках дополнительного образования в общеобразовательных учреждениях / В.В. Варлашин, О.А. Шамаков // Робототехника

и техническая кибернетика. — № 2 (19). — Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. — 2018. — С. 16-20.

3. Arduino Project Hub [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2020. — URL: <https://create.arduino.cc/> (Дата обращения: 04.11.2020)
4. MeArm — Pocket Sized DIY Robotic Arm Kits [Electronic resource] // MeArm: [site]. — 2020. — URL: <https://mearm.com/> (Дата обращения: 04.11.2020)
5. **Benjamin Gray.** MeArm Robot Arm — Your Robot — V1.0 [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2016. — URL: — <https://create.arduino.cc/> (Дата обращения: 04.11.2020)
6. Utilstudio — Joystick Controller for MeArm Robot — Recording Coordinates [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2019. — URL: — <https://create.arduino.cc/> (Дата обращения: 04.11.2020)
7. **Alessio Villa** — MeArm «Industrial-Like» Controller [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2017. — URL: — <https://create.arduino.cc/> — (Дата обращения: 04.11.2020)

Махов Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологий автоматизированного производства Егорьевского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
makhov.alex1979@yandex.ru

Makhov Alexander Alexandrovich — candidate Sc. Of Engineering, docent of sub-department «Technology of automated manufacturing» of ETI (branch) MSUT «STANKIN»
makhov.alex1979@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЭКОНОМИКИ

УДК 658.1

А.Э. Волков, Г.Л. Волкова
A.E. Volkov, G.L. Volkova

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЙ СПРОСА

DEMAND CURVE MODELING

В статье предпринята попытка построения кривой спроса на основе различных факторных моделей. Рассмотрены факторные модели прибыли предприятия. В первой предполагается, что все факторы не зависят друг от друга. Во второй рассматривается случай зависимости одного из факторов от другого. Для каждой из моделей показано, как строится кривая спроса и какой она вид имеет. Показано, что в первой модели кривая спроса описывается линейной зависимостью, а во второй модели — квадратичной. Использование второй уточненной факторной модели позволяет более точно прогнозировать дальнейшую траекторию движения компании.

The article attempts to construct the demand curve based on various factor models. Factor models of enterprise profitability are considered. The first one assumes that all factors are independent from each other. The second one considers the case of dependence of one factor on another. For each model we describe how the demand curve is constructed and what form it takes. It is shown that in the first model the demand curve is described by linear relationship, and in the second — by quadratic. The use of the second refined factor model allows to predict the path of the company more accurately.

Ключевые слова: кривая спроса, факторная модель прибыли, зависимость факторов друг от друга, коэффициент эластичности.

Keywords: demand curve, profitability factor model, factor codependence, elasticity coefficient.

Введение

В классической работе А. Маршала [1] впервые была сформулирована проблема построения кривой спроса. Сейчас достаточно хорошо изучены вопросы изменения кривой спроса в зависимости от изменения тех или иных параметров. При этом график кривой спроса в этих исследованиях либо прямолинейный, либо криволинейный. Каков же он в действительности, и от чего это зависит? В данной статье предпринята попытка ответить на данный вопрос.

Целью управления бизнесом на стратегическом уровне является рост его стоимости. Что касается управления компанией на тактическом уровне, то одним из основных показателей эффективности управления предлагается рассматривать прибыль.

Прибыль зависит от факторов, степень влияния которых можно оценить с помощью коэффициентов E_{Φ} эластичности. Они равны изменению в процентах прибыли при увеличении значения фактора на 1 %.

Представим прибыль в виде функции:

$$\pi = \pi(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n, \dots), \quad (1)$$

где Φ_i — i -й фактор прибыли. Относительное изменение прибыли выражается через относительные изменения факторов с помощью коэффициентов эластичности

$$\frac{\Delta\pi}{\pi} \approx \sum_{\Phi} E_{\Phi} \frac{\Delta\Phi}{\Phi}.$$

При традиционном факторном анализе [2, 3, 4] факторы Φ_i считаются независимыми друг от друга, а коэффициенты эластичности вычисляются так:

$$E_{\Phi} = \frac{\partial \pi}{\partial \Phi} \frac{\Phi}{\pi} \quad (2)$$

Однако управленческие мероприятия по воздействию на один из факторов должны проводиться с учетом возможных последствий, которые могут отразиться на других факторах. С этой целью авторами был предложен уточненный факторный анализ

прибыли, учитывающий взаимное влияние факторов друг на друга [5].

Если требуется оценить влияние фактора Φ_j на прибыль, то необходимо учитывать возможное влияние этого фактора на все остальные. В этом случае модель прибыли вместо зависимости (1) принимает следующий вид

$$\pi = \pi(\Phi_1(\Phi_j), \dots, \Phi_j, \dots, \Phi_n(\Phi_j)).$$

Оценивать чувствительность прибыли к составляющим ее факторам в рамках уточненного факторного анализа будем с помощью уточненных коэффициентов E_{Φ} эластичности, которые, как показано в [6, 7], рассчитываются по формуле

$$E_{\Phi_j} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial \pi}{\partial \Phi_i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \Phi_j} \right) \frac{\Phi_j}{\pi}. \quad (3)$$

Влияние факторов друг на друга представляет собой *корреляционную* связь, для которой можно установить лишь тенденцию изменения результирующего фактора при изменении величины влияющего фактора, т.е. установить теоретическую линию регрессии. В работе [8] показано, что производная

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial \Phi_j} = k$$

равна коэффициенту k регрессии, и её можно определить методом наименьших квадратов.

Проведем сравнительное моделирование кривой спроса в двух случаях: для традиционного и уточненного анализа прибыли. Рассмотрим упрощенную модель прибыли в виде

$$\pi = TR - TC = P \cdot Q - TC, \quad (4)$$

где TR — выручка; TC — общие затраты; P — цена товара; Q — объем продаж.

Проведем сравнительный анализ чувствительности прибыли к изменению двух факторов: цены (P) и объема продаж (Q). Определим эластичность прибыли по двум упомянутым факторам: (а) по традиционной факторной модели и (б) по уточненной факторной модели с учетом взаимного влияния факторов P и Q друг на друга.

В работе [9] было показано, что традиционную факторную модель можно рассматривать как частный случай уточненной факторной модели при условии независимости факторов.

Проанализируем работу компании в краткосрочном периоде работы, равном двум кварталам. Представим общие затраты TC в выражении (4) в виде [4]

$$TC = L \cdot Q + M \cdot Q + IDC,$$

где L — прямые затраты труда на единицу продукции (удельная трудоемкость); M — прямые затраты материалов на единицу продукции (удельная материалоемкость); IDC — косвенные затраты.

Итак, прибыль в данной модели представляет собой функцию пяти факторов:

$$\pi = \pi(P, Q, L, M, IDC).$$

Коэффициенты эластичности, вычисленные по формуле (2), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты эластичности

Факторы		Коэффициенты эластичности
Цена	P	$E_P = Q \cdot \frac{P}{\pi}$
Объем продаж	Q	$E_Q = (P - L - M) \cdot \frac{Q}{\pi}$
Удельная трудоемкость	L	$E_L = -\frac{L}{\pi} Q$
Удельная материалоемкость	M	$E_M = -\frac{M}{\pi} Q$
Косвенные затраты	IDC	$E_{IDC} = -IDC/\pi$

Далее будем считать, что имеется зависимость объема Q продаж от цены P . Остальные три фактора являются независимыми, и их влияние на другие факторы учитывать не будем. Коэффициенты эластичности прибыли к этим факторам не изменятся. Прибыль будет представлять уже функцию четырех независимых факторов:

$$\pi = \pi(P, Q(P), L, M, IDC).$$

Уточненный коэффициент эластичности прибыли по цене изменится в соответствии с формулой (3):

$$E_P = \frac{P}{\pi} \left[Q + (P - L - M) \frac{\partial Q}{\partial P} \right] \quad (5)$$

Пример 1. Рассмотрим классическую зависимость между объемом продаж и ценой товара для примера из работы [4]. В табл. 2 приведены данные о прибыли компании за первые два квартала. Цена повысилась 3 %, что привело к снижению объема продаж на 4 %. Прирост прибыли в процентах за второй квартал по сравнению с первым кварталом составил 16,8 %.

По традиционной факторной модели функция спроса является линейной и имеет вид (рис. 1а)

$$Q = -133,3 \cdot P + 2333.$$

Использование уточненной факторной модели позволяет рассматривать нелинейную функцию спроса (рис. 1б), которая соединяет те же две точки на траектории движения компании. Предположим, что уточненная криволинейная функция спроса дает точное значение прироста прибыли в 16,8 %.

Т.к. прирост цены составил 3 %, то по формуле (5) получаем

$$\frac{dQ}{dP} = -146,67 \quad (6)$$

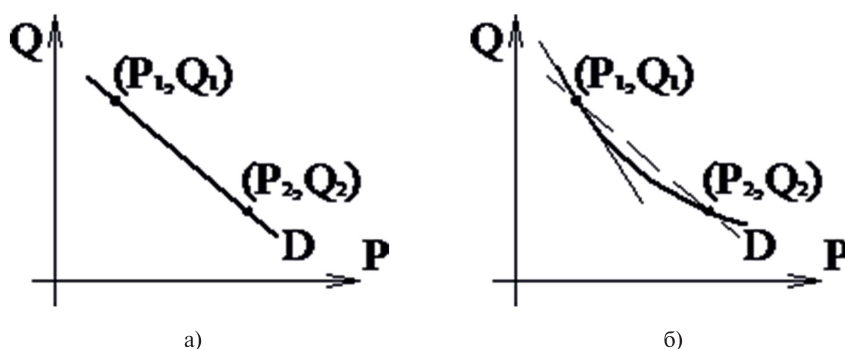


Рис. 1. Кривая спроса для примера 1: а) линейная, б) параболическая

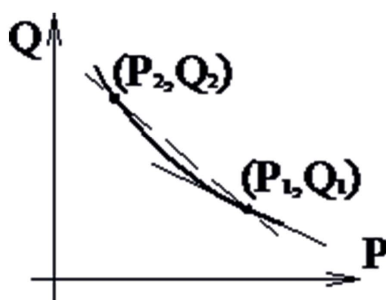


Рис. 2. Кривая спроса для примера 2

Функцию спроса можно представить в виде параболы, проходящей через точки 1 и 2 и имеющей в точке 1 производную, указанную выражением (6). Такая функция спроса показана на рис. 1б. Пунктирной линией для сравнения показана прямолинейная функция спроса, применяемая в традиционной факторной модели. Параболическая кривая спроса описывается уравнением

$$Q = 44,4 \cdot P^2 - 1035,6 \cdot P + 6911,1.$$

Пример 2. Рассмотрим случай снижения цены товара в зависимости от снижения удельной материалоемкости и удельной трудоемкости. Это в соответствии с классической зависимостью привело к повышению объема продаж компании. Предположим, что цена товара устанавливается на 25 % больше его себестоимости.

Себестоимость вычисляем так:

$$S = L + M + IDC/Q.$$

Так как $P = 1,25 \cdot S$, то прибыль компании преобразуем к виду

$$\pi = P \cdot Q - S \cdot Q = 0,25 \cdot S \cdot Q(P) = 0,2 \cdot P \cdot Q(P).$$

Новые значения показателей работы компании приведены в табл. 3. Расчет по традиционной фак-

торной модели показал прирост прибыли на 1,93 %. Реальный прирост прибыли составил 1,56 %. По уточненной факторной модели определяем

$$\frac{dQ}{dP} = -131,2 \tag{7}$$

и уравнение функции спроса (жирная кривая на рис. 2)

$$Q = 10,7 \cdot P^2 - 373 \cdot P + 3842. \tag{8}$$

На рис. 2 точки 1 и 2 имеют координаты (табл. 3) $P_1 = 11,25$; $Q_1 = 1000$ и $P_2 = 10,88$; $Q_2 = 1050$. Пунктирная прямая, соединяющая точки 1 и 2, представляет кривую спроса, соответствующую традиционной факторной модели, и описывается уравнением

$$Q = -135 \cdot P + 2520.$$

Тонкая сплошная прямая является касательной к функции спроса (8) в точке 1, а ее наклон определяется производной (7).

Рассмотренные выше примеры показывают, как с помощью уточненной факторной модели прибыли смоделировать кривую спроса. Это позволит прогнозировать дальнейшую траекторию движения компании. Уточненную факторную модель можно использовать в прогнозных целях, а также при разработке схемы материального стимулирования работников.

Таблица 2. Сравнительный пример расчета чувствительности прибыли к формирующим ее факторам для исследуемой компании для Примера 1

(а) по традиционной факторной модели

(б) по уточненной факторной модели

Показатели	Квартал I 2019	Квартал II 2019	Прирост		E_{Φ}	EI_{Φ}	Вклад в прибыль	
				%	(а)	(б)	(а)	(б)
Цена, тыс. руб. (P)	10	10.3	0.3	3.0 %	10.00	5.60	30.0 %	16.8 %
Объем продаж, шт. (Q)	1000	960	-40	-4.0 %	3.00	-	-12.0 %	-
Удел. материалоемкость (M)	5	5	0	0 %	-5.00	-5.00	0 %	0 %
Удел. трудоемкость (L)	2	2	0	0 %	-2.00	-2.00	0 %	0 %
Косвенные затраты (IDC)	2000	2000	0	0 %	-2.00	-2.00	0 %	0 %
Общие затраты (TC)	9000	8720	-280	-3.1 %				
Выручка (TR)	10000	9888	-112	-1.1 %				
Прибыль (π)	1000	1168	168	16.8 %			18.0 %	16.8 %

Таблица 3. Расчет чувствительности прибыли к формирующим ее факторам для исследуемой компании для Примера 2

(а) по традиционной факторной модели

(б) по уточненной факторной модели

Показатели	Квартал I 2019	Квартал II 2019	Прирост		E_{Φ}	EI_{Φ}	Вклад в прибыль	
				%	(а)	(б)	(а)	(б)
Цена, тыс. руб. (P)	11,25	10,88	-0,37	-3,3 %	5	-0.16	-16,4 %	1,56 %
Объем продаж, шт. (Q)	1000	1050	50	5,0 %	1,89	-	9,4 %	-
Удел. материалоемкость (M)	5	4,9	-0,1	-2,0 %	-2,22	-	4,4 %	-
Удел. трудоемкость (L)	2	1,9	-0,1	-5,0 %	-0,89	-	4,4 %	-
Косвенные затраты (IDC)	2000	2000	0	0,0 %	-0,89	-	0,0 %	-
Общие затраты (TC)	9000	9140	140	1,6 %				
Выручка (TR)	11250	11425	175	1,6 %				
Прибыль (π)	2250	2285	35	1,56 %			1,93 %	1,56 %

Библиографический список

1. **Маршал А.** Принципы экономической науки. — М.: Издательский дом: Прогресс, 1993. — 202 с.
2. **Егерев И.А.** Стоимость бизнеса: Искусство управления: Учеб. пособие. — М.: Дело, 2003. — 480 с.
3. **Еленева Ю.Я., Червенкова С.Г., Андреев В.Н.** Оценка бизнеса и управление стоимостью предприятия: Учеб. пособие. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2019. — 120 с.
4. **Мицкевич А.А.** Сбалансированная по прибыли система экономических показателей // Экономические стратегии, 2005, № 2, с. 88–93.
5. **Еленева Ю.Я., Волков А.Э., Волкова Г.Л.** Факторный анализ стоимости предприятия с учетом оценки влияния нематериальных активов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2006. № 3. С. 73–77.
6. **Волкова Г.Л., Волков А.Э., Волков В.А.** Механизм управления факторами инновационного развития : монография. 2-е изд., перераб. и доп. ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2019. — 88 с.
7. **Волков А.Э., Волкова Г.Л., Чараев Г.Г.** Модель управления нематериальными факторами роста стоимости // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 1 (19). С. 122–127.
8. **Volkova G.L., Volkov A.E., Nieszporek-Wolak J.** Costs steering system based on correlative factors // Kosztowe aspekty zarzadzania, Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, Czestochowa, Polska, 2006.
9. **Волков А.Э., Волкова Г.Л.** Управление прибылью компании: математические аспекты // Корпоративные стратегии, 2008, № 10, с. 6–7.

Волков Андрей Эрикович — д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
volkov411@gmail.com

Волкова Галина Львовна — канд. экон. наук, доцент, заведующий кафедрой физического воспитания и спорта ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Volkova.gl@yandex.ru

Volkov Andrey Erikovich — D.Sc. in Engineering, prof., prof. of department of «Theoretical mechanics and strength of materials» at MSUT «STANKIN»
volkov411@gmail.com

Volkova Galina L'ovna — Cand.S. in economic, associate professor, the head of the department «Physical education and sports» at MSUT «STANKIN»
Volkova.gl@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ МНК-ОЦЕНКИ ФУНКЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА

THE APPROXIMATION OF SOCIO-ECONOMIC RISK FUNCTION FOR OIL PIPELINE WITH LEAST-SQUARES METHOD

Рассматривается задача вычисления риска возникновения аварийной ситуации на участке нефтепровода. В данной статье выполняется построение МНК-оценки для функции социально-экономического риска. Нейросетевое моделирование применяется в ситуациях, когда зависимости между входными и выходными данными являются неявными. Производится генерация значений при помощи обученной нейросети и получение аналитического выражения в явном виде в форме регрессии первого порядка.

The problem of the risk of an emergency on an oil pipeline estimation is considered. In this paper, socio-economic risk function is estimated with LSM. Neural network modeling is used when the dependencies between input and output data are implicit. Trained neural network generates values and an analytical expression is obtained explicitly in the form of a first-order regression.

Ключевые слова: нейронные сети, социально-экономический риск, безопасность нефтепровода, МНК.

Keywords: neural networks, socio-economic risk, oil pipeline security, Least-Squares Method.

Нефтегазовая отрасль является одной из ключевых стратегических отраслей Российской Федерации. Для нее характерны как участие государства на 2/3, так и участие частных инвестиций на оставшуюся долю. Данная отрасль вносит основной вклад в пополнение федерального бюджета России. В этой связи, в целях обеспечения безопасности эксплуатации объектов отрасли, необходимо производить своевременную диагностику трубопроводов и другого нефтегазового оборудования.

Необходимо отметить, что нефтегазовая отрасль является высокотехнологичной отраслью промышленности, что обуславливает высокий уровень инновационного развития и инвестиций. Актуальной задачей является задача внедрения искусственного интеллекта в производственный процесс.

В настоящее время большое количество работ посвящено рискам возникновения аварийной ситуации и количественным методам их оценки. Существующие методы, такие как Event Tree Analysis (анализ дерева событий), статистическое моделирование по распределению Эрланга и Парето, применение теории надежности, дают менее достоверную оценку вероятности возникновения аварийной ситуации по сравнению с применением нейросетевого моделирования [1]. Применение искусственных нейронных сетей так-

же обуславливается тем, что они дают возможность найти неявные зависимости между переменными, которые могут изначально быть неочевидны.

В предыдущих исследованиях [1, 2, 4] нами была разработана классификация рисков возникновения аварийных ситуаций на участке нефтепровода.

Прямой риск (K) — вероятность возникновения аварийной ситуации.

Социально-экономический риск (R) — вероятность ущерба для предприятия вследствие негативного воздействия аварийной ситуации на социальную, экономическую среду региона.

Экологический риск (Q) — вероятность ущерба для предприятия вследствие негативного воздействия аварийной ситуации на окружающую среду.

Данная классификация наиболее точно аппроксимирует реальную ситуацию на исследуемом участке нефтепровода. Для моделирования каждого вида риска нами разработаны и обучены нейронные сети. Архитектура нейронной сети, моделирующей социально-экономический риск, изображена на рисунке 1.

Для величин рисков K , Q , R не существует аналитического выражения, поскольку они вычисляются при помощи нейронных сетей. Обучение используемых нейронных сетей класса Fully Connected Feed-Forward Neural Network (полносвязные нейронные

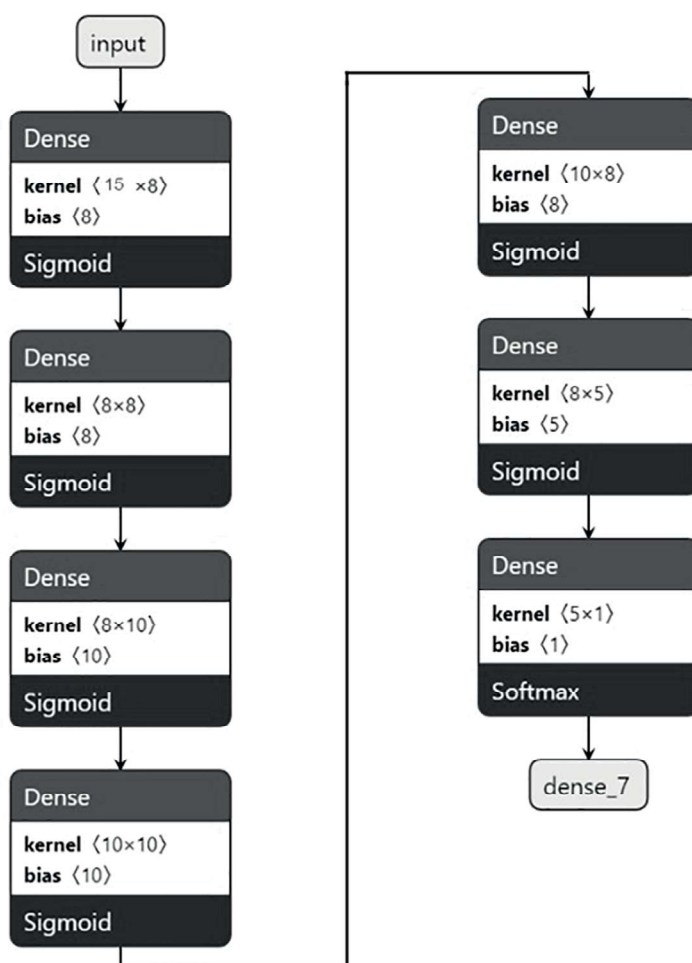


Рис. 1. Архитектура нейронной сети, моделирующей социально-экономический риск R

сети прямого распространения) проводилось при помощи алгоритма обратного распространения ошибки с учителем.

Целью данной статьи является получение аналитического выражения в явном виде для социально-экономического риска при помощи МНК в многомерном пространстве.

Построение МНК-оценки

Входными данными нейронной сети, моделирующей социально-экономический риск, является вектор-столбец $x \in R^n$ (для социально-экономического риска $n=15$), каждое значение которого соответствует определенной конфигурации исследуемого участка нефтепровода «табл. 1».

Для работы нейронных сетей элементы входного вектора, значения которых не ограничены (x_1, x_7, x_8 и x_{10}), подлежат нормировке путем центрирования с математическими ожиданиями $\mu_1, \mu_7, \mu_8, \mu_{10}$ и средними отклонениями $\sigma_1, \sigma_7, \sigma_8$ и σ_{10} , вычисленными по обучающей выборке. Таким образом, нормированный входной вектор $\|\hat{x}\| \leq 1$.

Для анализа будет интересно сравнить МНК-оценку для обучающей выборки с МНК-оценкой сгенерированных нейронной сетью значений. Поскольку данные во входном векторе неоднородны, то их необходимо нормировать, проведя центрирование величин. Непрерывные параметры можно дискретизировать, выбрав шаг прохода δ . Таким образом, для генерации входных значений используются различные комбинации дискретных параметров $x_i, i=1..n$ из единичного куба в пространстве R^n . На рисунке 2 схематично изображена гиперплоскость для переменных x_i и $x_j, i, j=1..n$ с соответствующим данному вектору выходным значением y .

МНК-оценку для социально экономического риска будем искать в виде регрессионной поверхности первого порядка:

$$\hat{R}(\bar{x}) = \sum_{k=1}^n a_k x_k + b \quad (1)$$

Для того, чтобы вывести уравнения оценки параметров регрессии, необходимо найти минимум

Таблица 1 Параметры нейронной сети, моделирующей социально-экономический риск

Переменная	Конфигурация участка трубопровода	Значение переменной
x_1	вероятная площадь аварии	$[0, +\infty)$
x_2	переходы через водные преграды	$\{0, 1\}$
x_3	переходы через болота	$\{0, 1\}$
x_4	переходы через ж/д и автодороги	$\{0, 1\}$
x_5	по поливным и орошаемым землям	$\{0, 1\}$
x_6	по территории вечномёрзлых грунтов	$\{0, 1\}$
x_7	расстояние до ближайшего объекта инфраструктуры	$[0, +\infty)$
x_8	количество промышленных предприятий вблизи трубопровода	$[0, +\infty) \cap \mathbb{N}$
x_9	прохождение вблизи мостов	$\{0, 1\}$
x_{10}	расстояние до ближайшего населенного пункта	$[0, +\infty)$
x_{11}	кабели междугородней связи	$\{0, 1\}$
x_{12}	силовые электрокабели	$\{0, 1\}$
x_{13}	вероятность разгерметизации	$[0, 1]$
x_{14}	прохождение на территории иностранного государства	$\{0, 1\}$
x_{15}	возможность ведения экономических санкций	$\{0, 1\}$

функции ошибки, которая имеет следующий вид:

$$E(a_k, b) = \sum_{l=1}^N (y_l - \hat{R}(\bar{x}_l))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

где N – количество наблюдений.

Для решения задачи нахождения безусловного экстремума необходимо все частные производные функции E по неизвестным параметрам регрессии a_k и b приравнять к нулю.

Для параметров регрессии a_k получаем n уравнений вида

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = \sum_{l=1}^N x_k^l \left(y_l - \left(\sum_{k=1}^n a_k x_k^l + b \right) \right) = 0 \quad (3)$$

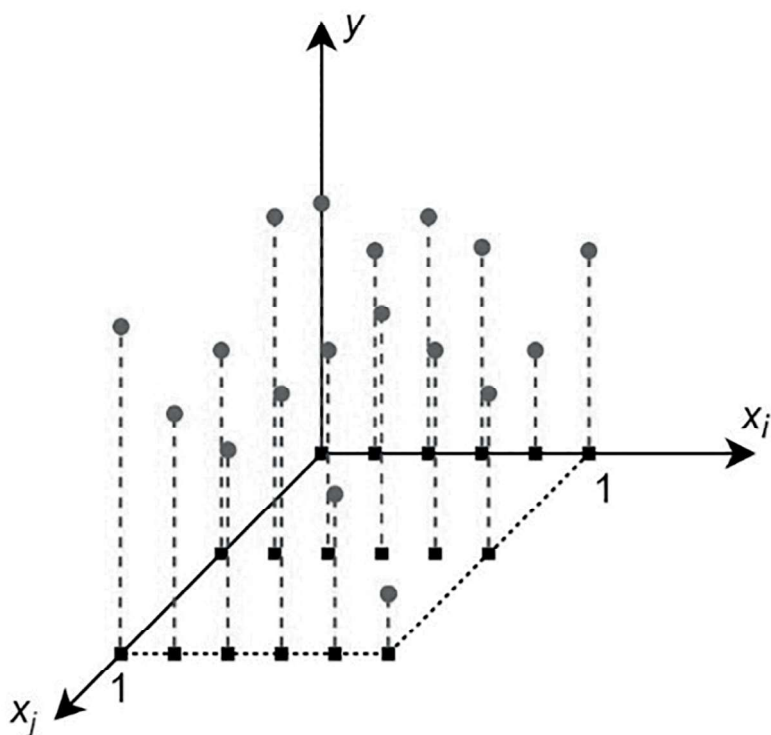
и одно уравнение для параметра c

$$\frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{l=1}^N \left(y_l - \left(\sum_{k=1}^n a_k x_k^l + b \right) \right) = 0 \quad (4)$$

Таким образом, для построения МНК-оценки первого порядка функции социально-экономического риска необходимо решить систему из 16 уравнений (так как размерность вектора входных параметров $n=15$).

Система уравнений решалась методом Гаусса при помощи программы на языке Python. В результате получаем следующее аналитическое выражение для функции прямого риска возникновения аварийной ситуации на участке нефтепровода:

$$\begin{aligned} \hat{R}(\bar{x}) = & 2,799x_1 + 1,648x_2 + 0,564x_3 + 1,220x_4 + 0,811x_5 + 0,617x_6 + 2,074x_7 + 2,898x_8 + 0,662x_9 \\ & + 2,455x_{10} + 0,039x_{11} + 1,087x_{12} + 2,381x_{13} + 0,866x_{14} + 1,719x_{15} - 0,718 \end{aligned} \quad (5)$$

Рис. 2. Значения на гиперплоскости x_i, x_j

Таким образом, в данной статье описана процедура получения МНК-оценки социально-экономического риска аварийной ситуации. Полученную оценку можно улучшить, повысив порядок регрессии, однако необходимо принять во внимание тот факт, что количество уравнений для коэффициентов регрессии возрастает нелинейно. Принципиальным является возможность получения явных аналитических выражений для ранее неизвестных неявных функций.

Библиографический список

1. **А.А. Нехрест-Бобкова** – Применение нейросетевых технологий для оценки вероятности аварийной ситуации на магистральной части газо-нефтепровода, РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция, № 3, 2020 г. 130–135
2. **А.А. Нехрест-Бобкова, А.А. Бурдина** – Механизм прогнозирования величины возможного ущерба на аварийно-опасных участках газо- и нефтепроводов (STIN)
3. **Nekhrest-Bobkova A.A.** Emergency probability for aircraft vehicle / A.A. Burdina, A.A. Nekhrest-Bobkova // Journal of Physics: Conference Series – 2021.
4. **Nekhrest-Bobkova A.A.** Neural-Network Prediction of Damage to Accident-Prone Sections of Oil and Gas Pipelines vehicle / A.A. Burdina, A.A. Nekhrest-Bobkova // Russian Engineering Research, – № 8 – 2021. – pp. 775–778.
5. **Шолле Франсуа.** Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
6. **Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова.** Метод наименьших квадратов: метод. указания. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.
7. **А.А. Бурдина, А.В. Бондаренко,** Методический подход к экономическому анализу комплексной эффективности проекта, Экономика устойчивого развития, № 3 (39), 2019 г., 169–174.
8. **Карпова, В.В.** Методический аппарат оценки экологического риска при авариях на нефтепроводах // дисс. ... канд. техн. наук 05.26.03 / Карпова Вильяна Васильевна [Место защиты: РГУ нефти и газа им. Губкина]. – Москва, 2007. – 237 с.
9. **Гэлаи, Д.** Основы риск-менеджмента / Д. Гэлаи, М. Кроуи, В. Б. Минасян, Р. Марк. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 390 с.

Нехрест-Бобкова Анна Александровна — аспирантка кафедры «Инновационная экономика, финансы и управление проектами»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ

nekhrest93@yandex.ru

Бурдина Анна Анатольевна — д-р экон. наук, профессор кафедры «Инновационная экономика, финансы и управление проектами», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ

annaburdina555@mail.ru

Nekhrest-Bobkova Anna Alexandrovna — PhD-student of Department of Innovative Economics, Finance and Project Management, Moscow Aviation Institute (National Research University) MAI

nekhrest93@yandex.ru

Burdina Anna Anatolievna — Doctor of Economic sciences. Professor of Department of Innovative Economics, Finance and Project Management, Moscow Aviation Institute (National Research University) MAI

annaburdina555@mail.ru

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ МГТУ «СТАНКИН»

УДК 378

С.Н. Григорьев, В.В. Кузин
S.N. Grigoriev, V.V. Kuzin

ВКЛАД УЧЕНИКОВ И.П. ТРЕТЬЯКОВА В РАЗВИТИЕ НАУКИ О РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

THE CONTRIBUTION OF I.P. TRETYAKOV POSTGRADUATE STUDENTS TO DEVELOPMENT OF METAL CUTTING SCIENCE

Проанализированы научные достижения учеников лауреата Государственной премии, доктора технических наук, профессора И.П. Третьякова. Показано, что многолетняя работа одного из создателей отечественной науки о резании материалов позволила создать интеллектуальный фундамент для всестороннего и углубленного изучения физических закономерностей процессов лезвийной и абразивно-алмазной обработки. Созданный несколькими поколениями научных исследователей «Третьяковский научный фонд» органично объединил «прошлое, настоящее и будущее» науки о резании материалов.

The scientific achievements of postgraduate students of State Prize laureate, Doctor of Technical Sciences, Professor I.P. Tretyakov were analyzed. It was shown that long-term work of one of founders of domestic metal cutting science made it possible to create an intellectual foundation for a comprehensive and in-depth study of physical laws of blade and abrasive-diamond processing. Tretyakov Science Foundation created by several generations of scientific researchers has organically combined "past, present and future" of metal cutting science.

Ключевые слова: МГТУ «СТАНКИН», Третьяков И.П., ученики, кафедра резания материалов, лезвийная и абразивно-алмазная обработка, режущий инструмент, керамика, покрытия.

Keywords: MSUT «STANKIN», Tretyakov I.P., postgraduate students, metal cutting department, blade and abrasive-diamond processing, cutting tools, ceramics, coatings.

Введение

Выдающийся советский ученый с разносторонними интересами, лауреат Государственной премии, доктор технических наук, профессор Иван Петрович Третьяков является одним из создателей отечественной науки о резании материалов, расцвет которой был достигнут благодаря его трудам и работам его учеников. Будучи в те годы ректором МГТУ «СТАНКИН» и заведующим кафедрой резания материалов, он отчетливо понимал значение этого научного направления для отечественной промышленности и необходимость подготовки научных кадров высшей квалификации для развития науки о резании материалов.

Научное наследие И.П. Третьякова включает как личные труды по физике процесса резания, прочности режущих инструментов, созданию новых

инструментальных материалов, так и библиотеку докторских и кандидатских диссертаций, которые выполнили его ученики. Созданная им методика подготовки высококвалифицированных научных кадров и ее постоянная адаптация под быстро изменяющиеся условия принесли огромную отдачу и превратили МГТУ «СТАНКИН» в один из ведущих учебных заведений Советского Союза. Он сумел создать сплоченный коллектив ученых, который целенаправленно занимался актуальными научными исследованиями.

Он воспитал не одно поколение «резальщиков», многие из которых впоследствии стали известными учеными. Под руководством И.П. Третьякова подготовлено два доктора технических наук и более сорока кандидатов технических наук. Четкая постановка цели и задач исследования, постоянный контроль при проведении экспериментов и обсуждение их

результатов значительно упростили самостоятельную работу аспирантов, выполнение экспериментальной части диссертации и психологическую подготовку к публичной защите. Многие из учеников И.П. Третьякова связали свою жизнь с высшей школой, а ряд его последователей проработали длительное время и продолжают трудиться в МГТУ «СТАНКИН».

Основная часть

Третьяков И.П. родился 23 июля 1907 года в Ростове-на-Дону. Во время обучения в МВТУ им. Баумана проявилась его склонность к научному познанию. В предвоенном 1940 году И.П. Третьяков успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Рациональная геометрия шлицево-прорезных фрез», а в 1950 году — докторскую диссертацию на тему «Исследование конструктивных элементов металлорежущего инструмента на прочность». Вся его дальнейшая педагогическая и научная деятельность связана с МГТУ «СТАНКИН».

В 1954 году И.П. Третьяков назначается на должности ректора станкоинструментального института и заведующего кафедрой резания материалов. Начало его работы в МГТУ «СТАНКИН» совпало с послевоенным этапом замены морально и физически устаревшего оборудования на отечественных предприятиях. Выявилась острая нехватка в новых технических решениях и технологиях изготовления деталей, в том числе из труднообрабатываемых материалов. Особо актуальным стало обеспечение этих технологий прогрессивными лезвийными и абразивными инструментами. И.П. Третьяков своевременно среагировал на эти запросы промышленности и активизировал исследования, начатые его предшественниками заведующими кафедрой резания материалов МГТУ «СТАНКИН» докторами технических наук, профессорами А.В. Панкиным, С.Ф. Глебовым и В.А. Кривоуховым. Эти три выдающихся ученых смогли за два десятилетия сформировать прочный фундамент для развития науки о резании материалов.

На первом этапе своей работы И.П. Третьяков сделал ставку на студентов-старшекурсников, работавших в кафедральном научном кружке. Он настойчиво учил их самостоятельной научной работе, и стремлению делать правильные выводы. Отбор наиболее достойных студентов по результатам их работы давал положительные результаты. Наиболее перспективных студентов И.П. Третьяков рекомендовал для поступления в аспирантуру и становился научным руководителем их кандидатских диссертаций. Этот подход нравился молодым ученым и вызвал заинтересованное отношение в других высших учебных заведениях страны. Подкреплялось это внимание оснащением лаборатории кафедры комплексом уникального лабораторного оборудования, созданного под руководством И.П. Третьякова.

Со всех уголков СССР и из-за границы к Ивану Петровичу Третьякову приезжали лучшие выпускники

ВУЗов для поступления в аспирантуру. Это имело большое значение не только развития кафедры резания материалов МГТУ «СТАНКИН», но и для обогащения науки о резании материалов. Все кафедральные исследования отличались системным подходом к изучению процесса резания, возможностью проверки результатов теоретических и экспериментальных исследований на крупных предприятиях Советского Союза, заинтересованных в новых технических решениях из МГТУ «СТАНКИН». Суммирование усилий кафедральной науки с возможностями промышленности создало надежную основу для развития учебной и научно-исследовательской деятельности кафедры резания материалов.

Традиционно с середины пятидесятых годов на кафедре резания материалов МГТУ «СТАНКИН» параллельно развивались два научных направления: обработка лезвийным и абразивно-алмазным инструментом. Эти направления И.П. Третьяков объединил единым методологическим подходом, основанным на системном анализе процесса резания и ориентированных теоретико-экспериментальных исследованиях. Закономерности, установленные в выполненных исследованиях, эффективно использовались для решения практических задач, определенных промышленностью. Кафедральный научный «задел» по этим важнейшим направлениям подкреплялся созданными уникальными методиками и лабораторными стендами, с использованием которых изучались физические основы резания материалов лезвийным и абразивно-алмазным инструментом.

Последовательно проанализируем вклад учеников И.П. Третьякова в развитие этих научных направлений.

Труды учеников И.П. Третьякова по лезвийной обработке

Среди учеников И.П. Третьякова приоритетное место занимают два видных ученых в области резания материалов, являющихся основателями собственных научных школ. Это Сергей Семенович Силин и Анатолий Степанович Верещака.

Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, академик Академии технологических наук РФ, заслуженный профессор Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева, почетный гражданин города Рыбинска С.С. Силин защитил докторскую диссертацию в Московском станкоинструментальном институте в 1970 году. С.С. Силин создал новое научное направление «Применение аналитического метода определения параметров обрабатываемости материалов резанием», обеспечивающее эффективную оптимизацию операций механической обработки деталей сложной формы с учетом обеспечения качества и себестоимости. С.С. Силин опубликовал более 300 научных трудов, подготовил шесть докторов и более тридцати кандидатов технических наук.

Заслуженный деятель науки и техники РФ, Лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор А.С. Верещака защитил докторскую диссертацию в Московском станко-инструментальном институте в 1986 году. С 1989 по 1999 год он руководил кафедрой резания материалов и активно развивал научное направление «Режущие инструменты с износостойкими покрытиями». А.С. Верещака опубликовал четыре монографии, более 300 научных статей, двенадцать учебников и учебных пособий, подготовил семь докторов и двадцать два кандидата технических наук. Им получено 84 авторских свидетельств СССР, патентов РФ, Украины, США, ФРГ, Японии, Франции и Великобритании.

Физика процесса резания всегда находилась в фокусе внимания И.П. Третьякова. Понимая важность этого исследовательского направления, он акцентировал внимание многих учеников на изучении условий контактного взаимодействия разных лезвийных инструментов с заготовками при резании. Все аспиранты уделяли внимание этому физическому аспекту в резании. Однако первой ориентированной работой по выявлению основных закономерностей контактного взаимодействия была диссертация аспиранта А.Х. Раздобреева (1965 г.). Он изучил природу формирования вынужденных колебаний в области контактного взаимодействия фрезы с заготовкой, а также выявил взаимосвязь вынужденных колебаний при фрезеровании с волнистостью обработанной поверхности.

Аспирант В.И. Панчишин (1969 г.) исследовал процессы схватывания инструментального и обрабатываемого материала, что имело большое значение для создания инструментов и отработки технологических процессов изготовления деталей для авиационной промышленности. Исследованию особенности процесса резания в условиях действия ультразвуковых колебаний посвятил свою диссертацию аспирант из города Свердловск В.А. Привалов (1970 г.). На основе установленных закономерностей влияния вибраций на контактные процессы он разработал технологические рекомендации по принудительному наложению дополнительных вибраций на режущий инструмент при предварительной обработке заготовок.

Метод расчета напряженного и деформированного состояния металла в процессе резания на основе теории пластического течения неоднородного тела создал аспирант из города Красногорск С.Г. Мелихов (1971 г.). Аспирант кафедры К.Б. Алиев (1973 г.) экспериментально исследовал диффузионное взаимодействие инструментальных и обрабатываемых материалов при резании, а аспирант В.И. Амарией (1973 г.) выявил базовые закономерности процесса схватываемости обрабатываемых и инструментальных материалов при статических и динамических нагрузках. Условия трения контактного взаимодействия инструментальных и обра-

батываемых материалов проанализировал А.С. Жогин (1976 г.). Выявленные взаимосвязи позволили ему определить методы регулирования трения инструмента с заготовкой при резании. Влияние микролегирующих добавок в конструкционные и инструментальные стали на характер контактного взаимодействия при резании изучил соискатель из города Курган Иванов В.Н. (1981 г.).

Исследование прочности режущих инструментов традиционно является актуальной научной темой. К исследованиям по этой тематике И.П. Третьяков привлекал наиболее способных аспирантов после детальной проработки ими его докторской диссертации. Только после столь серьезной предварительной работы «счастливчики» допускались И.П. Третьяковым к самостоятельным исследованиям. Первым «счастливчиком» стал аспирант из КНР Му-Цзэн (1960 г.), который выполнил экспериментально-теоретическое исследование прочности быстрорежущих протяжек с учетом концентрации внутренних напряжений. Продолжила эти исследования Э.Ф. Эйхманс (1964 г.) в отношении твердосплавных инструментов. Она изучила прочностные характеристики разных твердых сплавов, связала их с режущими свойствами инструментов и на этой основе сформулировала рекомендации по выбору рациональной марки твердого сплава повышенной прочности для обработки заготовок из разных конструкционных сталей. Характер разрушения режущей части твердосплавного инструмента проанализировал Н.В. Яцук (1970 г.). Он выявил взаимосвязь внезапных отказов инструментов из разных твердых сплавов с их прочностными характеристиками.

Особое внимание И.П. Третьяков уделял выявлению особенностей процесса резания лезвийными инструментами, причем приоритетное значение имели монокристаллические твердосплавные и керамические осевые инструменты. В частности, В.А. Синапальников (1962 г.) исследовал процесс фасонного точения твердосплавным инструментом и твердосплавными фасонными фрезами. Основные закономерности скоростного развертывания керамическим и твердосплавным инструментом установил Р.Н. Рыньков (1965 г.). О.С. Мальцев (1968 г.) на основе результатов исследования режущих свойств монокристаллических твердосплавных спиральных сверл при обработке жаропрочных и маломангнитных сталей разработал рациональную конструкцию их рабочей части для этих условий эксплуатации. Работы по этой теме продолжил Л.П. Меркулов (1970 г.), который изучил особенности процесса фрезерования труднообрабатываемых материалов монокристаллическими твердосплавными концевыми фрезами. На основании выявленных закономерностей износа этого специального инструмента и он сформулировал рекомендации по повышению их эксплуатационной надежности.

А.Д. Агеев (1971 г.) в результате исследования процесса нарезания резьбы в высокопрочных закаленных сталях мелкоразмерными твердосплавными метчиками выявил взаимосвязь геометрии этих сложнопрофильных инструментов с их стойкостью и надежностью. Полученные закономерности были использованы для подготовки конструкторских и технологических рекомендаций. Аспирант из Болгарии П.Т. Енчев (1974 г.) детально изучил и проанализировал эксплуатационные характеристики монолитных твердосплавных спиральных сверл при сверлении сложнолегированной хромоникелевольфрамовой стали и предложил к использованию технологические рекомендации по назначению оптимального режима резания при изготовлении деталей из этой труднообрабатываемой стали.

Большое внимание И.П. Третьяков уделял созданию надежных инструментов из керамики и сверхтвердых материалов. Разработке этой остроактуальной темы посвящены две кандидатские диссертации. Аспирант из города Омска Д.М. Летун (1967 г.) исследовал процесс точения алмазными и рубиновыми резаками. Развитию этого направления посвятил свою кандидатскую диссертацию М.Е. Каминский (1969 г.).

Очень часто представители промышленности обращались к И.П. Третьякову за технической помощью по определенным проблемным вопросам и всегда находили понимание. К решению этих задач заведующий кафедрой обязательно подключал аспирантов. Поэтому многие кандидатские диссертации были выполнены по прямым договорам с промышленными предприятиями. В частности, аспирант И.С. Анисимов (1967 г.) исследовал влияние разных составов смазочно-охлаждающих жидкостей на процессы в контактной зоне инструмента с заготовкой. С использованием этих результатов ему удалось разработать рекомендации по эффективному применению смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов. Внедрение этих рекомендаций позволило предприятию-заказчику повысить производительность обработки многих деталей.

Уникальную научную работу по исследованию процесса резания заготовок из термопластов выполнил аспирант В.И. Приезжий (1969 г.). Результатом явились закономерности этого процесса, а также взаимосвязи геометрии используемых инструментов и параметров режима резания с качественными параметрами обработанной поверхности. Аспирант из города Курган Г.М. Батарчук (1973 г.) оптимизировал процесс торцевого фрезерования заготовок из специальных сталей фрезами, оснащенными твердым сплавом, и сформулировал технологические рекомендации по назначению параметров режима фрезерования. Польский аспирант Я.Я. Яворский (1980 г.) выполнил оригинальную по структуре диссертационную работу, логично совместив в ней части взаимос-

вязанные части: (1) исследование процесса резания инструментом из малолегированных быстрорежущих сталей, (2) изучение процесса бездефектного шлифования малолегированных быстрорежущих сталей, (3) технология заточки инструментов из малолегированных быстрорежущих сталей и (4) определение областей и условий эффективного применения инструментов из малолегированных быстрорежущих сталей.

Поистине, историческая заслуга принадлежит И.П. Третьякову в том, что специалисты кафедры резания МГТУ «СТАНКИН» совместно с учеными из Харьковского физико-технического института начали совместный проект по созданию режущих инструментов с покрытиями (рис. 1). Первую диссертационную работу по этой тематике выполнил аспирант из Ульяновска В.П. Табаков (1975 г.). Он исследовал влияние покрытий разного состава на характеристики инструментального материала и впервые доказал высокую эффективность инструментов с износостойкими покрытиями в условиях непрерывного резания. П.С. Деревлев (1978 г.) изучил работоспособность режущего инструмента с покрытиями в условиях прерывистого резания и сформулировал базовые требования к износостойким покрытиям, наносимым на рабочие поверхности инструментов. Аспирант из Кирова С.В. Касьянов (1979 г.) на основании глубокого анализа режущих свойств инструментов с износостойкими покрытиями в разных условиях эксплуатации определил перспективные направления совершенствования этих инструментов и сформулировал основные пути их дальнейшего развития. Аспирант из Индии Хусейн Вахид в 1984 году исследовал большую группу композиционных покрытий и на основе результатов их высокотемпературного контактного взаимодействия с разными обрабатываемыми материалами предложил рациональные варианты композиционных покрытий для твердосплавных инструментов, предназначенных для комплексной автоматизации.

Базовые закономерности, выявленные в этих трех пионерских работах, были детально изучены в следующих кандидатских диссертациях, выполненных специалистами-производственниками. А.А. Этингант (1981 г.) выявил взаимосвязь технологических параметров процесса конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой с эксплуатационными характеристиками режущих инструментов. А.А. Ксензов уделил особое внимание быстрорежущими инструментами с износостойкими покрытиями и исследовал их износ при обработке деталей из жаропрочных сплавов. Выявленные закономерности позволили ему сформулировать технологические рекомендации, обеспечивающие повышение эффективности процесса резания при изготовлении деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов.



Третьяков И.П. заслушивает научные сообщения разработчиков инструментов с покрытиями (слева направо — С.В. Касьянов, А.С. Верещака, И.П. Третьяков, П.С. Деревлев, А.А. Ксензов)

Последнюю диссертационную работу под руководством И.П. Третьякова выполнил В.В. Кузин (1986 г.). Он изучил процесс износа твердосплавных инструментов с разными покрытиями и на этой основе предложил мероприятия, обеспечивающие повышение работоспособности и надежности твердосплавных инструментов.

Дальнейшую подготовку специалистов высшей квалификации по данному научному направлению осуществляли доктора технических наук, профессора А.С. Верещака и С.Н. Григорьев [1–5].

Труды учеников И.П. Третьякова по абразивно-алмазной обработке

И.П. Третьяков тонко почувствовал и своевременно отреагировал на потребность промышленности в технологиях, которые могли обеспечить изготовление особо точных и качественных деталей. Исходя из собственных прогнозов по развитию абразивно-алмазной обработке И.П. Третьяков начал развивать на кафедре научное направление по созданию разных методов для шлифования.

Первая работа по шлифовальным технологиям выполнена на кафедре аспирантом из Ульяновска

И.И. Тимофеевым (1959 г.). Он исследовал кинематику и динамику весьма стохастического процесса шлифования периферией круга, удельный вес которого превышает более 50 % от общей трудоемкости механической обработки деталей. Продолжила эти исследования аспирантка из Алма-Аты Р.Р. Азербайева (1972 г.). В кандидатской диссертации на тему «Некоторые вопросы исследования процесса сверхскоростного шлифования» она проанализировала разные аспекты повышения эффективности абразивной обработки изделий из разных конструкционных и специальных материалов.

В период с 1972 по 1976 года были защищены четыре кандидатские диссертации, результаты которых явились базой для создания прогрессивных абразивных шлифовальных кругов. В 1972 году диссертацию защитил Ю.Б. Горячкин из города Полтава. Он исследовал характер взаимодействия абразивного зерна и связки шлифовальных инструментов при статических нагрузках. А.Б. Карпов (1973 г.) изучил характер взаимодействия абразивного зерна и связки шлифовальных инструментов при динамических нагрузках». Аспирант из города Самарканд

С.Х. Захидов (1974 г.) исследовал прочность удер- жания зерна в связке при температурно-силовых взаимодействиях и определил требования в высокопроизводительных шлифовальных инструментах. Аспирант из города Курган В.И. Курдюков (1976 г.) исследовал упругие и демпфирующие свойства связок шлифовальных кругов, что позволило обоснованно подойти к выбору основных структурных компонентов шлифовальных кругов.

Разработке абразивных инструментов для обработки фасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов посвящены кандидатские диссертации, в которых были определены научные предпосылки разработки высокопористых шлифовальных кругов. Родоначальником этих работ является аспирант из города Оренбург Л.Л. Ильичев (1975 г.), который в своем исследовании выявил взаимосвязи структуры шлифовальных лент с качественными параметрами процесса абразивной обработки. Эти взаимосвязи более детально изучил аспирант из города Курган Б.П. Кудряшов (1983 г.). Он создал шлифовальные круги нового поколения со специальной структурой для шлифования быстрорежущих сталей и жаропрочных сплавов. Эти исследования продолжил аспирант из города Ташкент С.Ж. Турсунов (1985 г.).

В дальнейшем результаты этих исследований обобщил доктор технических наук, профессор В.К. Старков. Он сформулировал принципы управления структурой шлифовальных кругов и продолжил развивать это научное направление.

В основу создания алмазно-абразивных инструментов, применяющихся в специфических условиях эксплуатации, И.П. Третьяков положил необходимость увеличения прочности алмазных и абразивных зерен, а также шлифовальных инструментов в целом. Над решением этой проблемы работал аспирант из города Ташкент Р. Абидов (1968 г.), создавший новый метод определения механической прочности алмазных и абразивных зерен. Аспирант из города Курган Ю.Б. Горшков (1977 г.) определил научные основы применения микрокристаллических прокатанных электрокорундов в абразивных кругах. Развил этот подход в проектировании шлифовальных инструментов аспирант из города Кемерово А.Н. Коротков (1980 г.), который на основании изучения прочности шлифовальных инструментов сформулировал основные мероприятия по улучшению их режущей способности. В настоящее время доктор технических наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы РФ А.Н. Коротков является заведующим кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» в Кузбасском государственном техническом университете им. Т.Ф. Горбачева. Он развивает собственную научную школу по абразивно-алмазной обработке.

Под руководством И.П. Третьякова выполнен цикл диссертационных работ по исследованию и раз-

работке инструментов из природных и синтетических алмазов. Аспирант из Болгарии П.Н. Томов (1967 г.) изучил закономерности алмазного шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов и обеспечил повышение производительности сложнопрофильных деталей ответственного назначения. Эта работа обеспечила создание специальных алмазных инструментов для высокопроизводительной обработки изделий из пластичных и хрупких материалов.

Продолжил эти исследования аспирант, и затем профессор кафедры резания материалов В.И. Власов (1968 г.), изучивший фрикционные свойства металлических связок алмазных шлифовальных кругов. Результаты этого важного исследования доказали возможность эффективного применения алмазной обработки как для предварительных, так и финишных операций при условии выполнения особых требований к технологиям и оборудованию.

Аспирант из города Фрунзе В.П. Тутлис (1971 г.) выявил основные закономерности влияния прочности зерен алмазных шлифовальных кругов на качество поверхностного слоя изделий. Исследовал свойства и режущую способность синтетических алмазов специальной формы аспирант из города Полтава М.С. Пивоваров (1975 г.). Выводы этих диссертаций были положены в основу создания алмазных инструментов на основе рационального выбора структурных элементов и технологии изготовления.

Заключение

Сегодня, спустя почти семьдесят лет со времени защиты первой диссертационной работы, выполненной под руководством И.П. Третьякова, ясно, что наследие его учеников органично связывает научное «прошлое и настоящее». Все эти годы были периодом напряженного научного поиска и неустанного труда. Обобщение результатов многообразных исследований требовало от И.П. Третьякова огромного труда и концентрации знаний. Доведенные до логического завершения исследования давали целостное представление о разных аспектах лезвийной и абразивно-алмазной обработки. Требование И.П. Третьякова к своим ученикам об обязательном создании оригинальных методик и экспериментальных установок, определили безусловную научную новизну и практическую значимость всех диссертаций. На основе защищенных диссертаций И.П. Третьяков формулировал задачи для новых исследований, работа над которыми никогда не прекращалась.

В результате многолетней целенаправленной работы И.П. Третьяков смог создать интеллектуальный фундамент для всестороннего и углубленного изучения физических закономерностей процесса резания. Этот «Третьяковский научный фонд», содержащий научные результаты, полученные несколькими поколениями исследователей, особенно важен для сегодняшних и завтрашних ученых, развивающих науку о резании материалов.

Библиографический список

1. Григорьев С.Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 3 (11). С. 7–13.
2. Григорьев С.Н. Развитие отечественного станкостроения – фундамент модернизации машиностроительного производства // Автоматизация в промышленности. 2012. № 5. С. 04–07.
3. Григорьев С.Н., Еленева Ю.Я. Подготовка кадров оборонно-промышленного комплекса России: проблемы и пути их решения // Высшее образование в России. 2013. № 6. С. 3–11.
4. Григорьев С.Н. Решение задач технологического перевооружения машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 3. С. 5–9.
5. Григорьев С.Н. Повышение эффективности подготовки инженерно-технических кадров для машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 3 (22). С. 7–13.

Григорьев Сергей Николаевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
s.grigoriev@stankin.ru

Кузин Валерий Викторович – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой технологического проектирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
dr.kuzinvalery@yandex.ru

Grigoriev Sergey Nikolaevich – doctor Sc. of Engineering, prof., head of the sub-department of High-Efficiency Processing Technologies, MSUT «STANKIN»
s.grigoriev@stankin.ru

Kuzin Valeriy Viktorovich – doctor Sc. of Engineering, associate professor, head of the sub-department of Technological Design, MSUT «STANKIN»
dr.kuzinvalery@yandex.ru
