

2.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Р.А. Нежметдинов, Е.В. Путинцева, Р.Р. Чумак

Практические аспекты проведения тестовых испытаний программ логического управления технологическим оборудованием 8

А.В. Быкова, А.В. Капитанов

Принципы взаимодействия автоматизированной системы взаимоотношений с клиентами и автоматизированных систем предприятия на различных этапах жизненного цикла продукции 15

М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов

Влияние показателя общей эффективности оборудования на контроль деталей после особо ответственной технологической операции с дальнейшим планированием производственного расписания на предприятиях мелкосерийного типа производства 22

С.В. Евстафиева

Разработка методики испытаний для СЧПУ станками с динамически изменяемой кинематикой 26

В.А. Долгов, Н.В. Долгов, А.А. Акимов, О.С. Прошкина

Особенности расчета технологического цикла сборки изделия с нестабильной длительностью операций в многономенклатурном производстве методами имитационного моделирования и математической статистики..... 34

Ю.А. Темпель, Д.Е. Васьков, О.А. Темпель

Методика автоматизированной коррекции управляющих программ для станков с ЧПУ с учетом температурного фактора и сил резания 42

А.Г. Карлов

Изобретательские решения в процессе эволюции автоматизированных систем накопления кинетической энергии с применением ресурсов программного продукта Solving Mill 2.0 47

2.5.4. РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В.А. Плотников, Г.К. Старых, Я.И. Каменев, А.А. Давтян, В.В. Серебряный

Применение нейронной сети YOLOv5 для распознавания объектов на соревнованиях по автономной подводной робототехнике Singapore AUV Challenge..... 60

Вассуф Язан, А.В. Тарасенко, М.В. Коржуков, В.В. Серебряный

Разработка системы помощи водителю при повороте для общественного транспорта 67

Я.И. Пимушкин, М.М. Стебулянин

Коррекция объёмной точности портальной системы
с помощью лазерного трекера..... 80

О.Д. Егоров

Разбиение погрешности мехатронного модуля
между его конструктивными элементами 87

2.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А.Н. Соболев, А.В. Ривкин, А.Я. Некрасов, М.О. Арбузов

Автоматизированное проектирование мальтийских механизмов внутреннего профиля... 91

Е.В. Фомин, К.К. Снегирева, В.А. Слуцков

Экспериментальное исследование обрабатываемости
резанием альфа титановых сплавов 99

Е.В. Артамонов, Т.Е. Костив, М.О. Чернышов, Д.А. Русских

Создание режущих твердосплавных пластин
повышенной прочности для сборных инструментов..... 106

2.5.6. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

П.А. Иванов, В.А. Левко, О.В. Литовка, Л.П. Сысоева

Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней
поверхности заготовок из латунных сплавов..... 114

С.В. Никитин, Ю.А. Темпель, Д.Е. Писарев

Исследование и разработка технологических инноваций в нефтегазовом
машиностроении: трехпозиционная дисковая шибберная задвижка 125

2.5.7. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

Влияние терминов на выбор технологии штамповки 132

СОБЫТИЯ И ДАТЫ 141

2.3.3. AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

R.A. Nezhmetdinov, E.V. Putintseva, R.R. Chumak

Practical aspects of error detection for testing logic control programs for PLC..... 8

A.V. Bykova, A.V. Kapitanov

Interaction between Customer Relationship Management system and automated enterprise systems on the various stages of the product life cycle 15

M.A. Shutikov, A.N. Feofanov

The influence of the indicator of the overall efficiency of equipment on the control of parts after a special responsible technological operation with further planning of the production schedule at small-scale enterprises 22

S.V. Evstafieva

Development of a test procedure for CNC for the machine tools with dynamically variable kinematics 26

V.A. Dolgov, N.V. Dolgov, A.A. Akimov, O.S. Proshkina

Features of the calculation of the technological cycle of assembly of a product with an unstable duration of operations in a multi-product production using simulation modeling and mathematical statistics..... 34

Yu.A. Tempel, D.E. Vaskov, O.A. Tempel

Method of automated correction of control programs for CNC machines, taking into account the temperature factor and cutting forces 42

A.G. Karlov

Inventive solutions in the process of evolution of automated kinetic energy storage systems based on the use of resources of the Solving Mill 2.0 software product 47

2.5.4. ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

V.A. Plotnikov, G.K. Starykh, Ya.M. Kamenev, A.A. Davtyan, V.V. Serebrenny

Using YOLOv5 neural network for object detection at the Singapore AUV Challenge..... 60

Wassouf Yazan, A.V. Tarasenko, M.V. Korzhukov, V.V. Serebrenny

Development of a driver assistance system while turning for public transport..... 67

Ya.I. Pimushkin, M.M. Stebulyanin

Correction of volumetric accuracy of the portal system using a laser tracker 80

O.D. Egorov

Splitting the error of a mechatronic module between it's structural elements 87

2.5.5. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

- A.N. Sobolev, A.V. Rivkin, A.Ya. Nekrasov, M.O. Arbuzov**
Computer-aided design of maltese internal profile mechanisms 91
- E.V. Fomin, K.K. Snegireva, V.A. Slutskov**
Experimental study of machinability alpha titanium alloy 99
- E.V. Artamonov, T.E. Kostiv, M.O. Chernyshov, D.A. Russkikh**
Creation of cutting carbide inserts of increased strength for assembled tools 105
-

2.5.6. TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

- P.A. Ivanov, V.A. Levko, O.V. Litovka, L.P. Sysoeva**
Brass alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining
of the inner surface 114
- S.V. Nikitin, Yu.A. Tempel, D.E. Pisarev**
Research and development of technological innovations in oil and gas engineering:
three-position butterfly gate valve 125
-

2.5.7. TECHNOLOGIES AND MACHINES OF PROCESSING BY PRESSURE

- A.M. Dmitriev, N.V. Korobova**
The influence of terms on the choice of stamping technology for hollow cylindrical
parts having a bottom 132
-

EVENTS AND DATES 141

2.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 51-74

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Р.А. Нежметдинов, Е.В. Путинцева, Р.Р. Чумак
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Статья посвящена рассмотрению математических аспектов процесса тестирования систем логического управления на этапе разработки программы управления. Рассмотрены два математических подхода для обнаружения ошибок в программном обеспечении, а также приведены примеры их практического использования для программ ПЛК.

Ключевые слова: тестирование, критерий интенсивности обнаружения ошибок, критерий заданного значения средней наработки на отказ, программа логического управления.

PRACTICAL ASPECTS OF ERROR DETECTION FOR TESTING LOGIC CONTROL PROGRAMS FOR PLC

R.A. Nezhmetdinov, E.V. Putintseva, R.R. Chumak
MSUT "STANKIN"

Abstract

The article is devoted to the mathematical aspects of the process of testing logical control systems at the stage of development of the control program. Two mathematical approaches for detecting errors in software, their technical base, and examples of their practical use are considered.

Keywords: testing, a criterion for the intensity of error detection, a criterion for a given value of the average time to failure, logical control program.

Введение

Анализ и обнаружение ошибок в программном обеспечении – это субъективный процесс. Широкий круг специалистов рассматривает различные варианты проверки разрабатываемой системы на наличие ошибок, в зависимости от поставленных целей, решаемых задач, бюджета проекта, временных рамок и т.д. [1, 2, 5, 9, 12]. Чем разнообразнее комплекс мер по тестированию разрабатываемой системы логического управления, тем всестороннее будут исследованы все ее аспекты и возможные проблемы.

Для повышения эффективности испытания, его ускорения и уменьшения стоимости, необходимо использовать методы, средства и методики, позволяющие избежать влияние недостатков традиционных подходов к тестированию. Эта цель может быть достигнута путем внедрения однозначных математических критериев для принятия решения о результатах тестовых испытаний [4].

Понятийный аппарат и математические подходы к обнаружению ошибок в программном обеспечении. Среди имеющихся математических критериев, которые можно применить к процессу тестирования, рассмотрим два, которые непосредственно влияют на оценку процесса тестирования: критерий интенсивности обнаружения ошибок и критерий заданного значения средней наработки на отказ.

Критерий интенсивности обнаружения ошибок. При работе с указанным критерием предполагается, что во время одного эксперимента обнаруживается не более одной ошибки и каждая ошибка до начала следующего эксперимента устраняется.

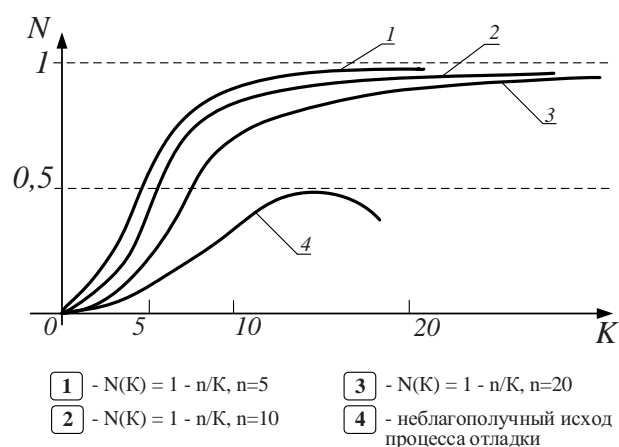


Рис. 1. Кривая зависимости прекращения испытаний от количества обнаруженных и устраненных ошибок

Тогда можно предположить, что при благоприятном ходе отладки и испытания, кривая зависимости выражается уравнением:

$$N(K) = 1 - \frac{n}{K}, \quad (1)$$

где n – количество обнаруженных и устраненных ошибок; K – количество экспериментов.

Как видно из уравнения (1), кривая будет асимптотически стремиться к единице. Причем, чем меньше становится значение коэффициента n , тем быстрее функция $N(K)$ будет стремиться к 1, а чем больше значение переменной K , тем значение функции $N(K)$ ближе к 1 (рис. 1, кривые 1, 2, 3). Кривая 4 свидетельствует о неблагоприятном ходе процесса [4].

Тогда в качестве критерия прекращения испытаний можно принять следующее условие: $N > 0,95$, т.е., например, обнаружение в последних двухстах экспериментах не более трех ошибок [4].

Критерий заданного значения средней наработки на отказ. В рамках применения критерия, который также носит название *критерий Дж. Д. Муса*, сделано два предположения:

1. Суммарное количество обнаруженных и устраненных дефектов в программе (под дефектом понимается любая причина неудовлетворенности свойствами программы) описывается функцией времени работы τ [4]:

$$n = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{c \cdot \tau}{M_0 T_0}\right) \right], \quad (2)$$

где N_0 – исходное количество дефектов в программе; M_0 – общее количество дефектов, которое может проявиться за время эксплуатации программного средства; T_0 – средняя наработка на отказ в начале испытаний¹; C – коэффициент сжатия тестов [4].

Коэффициент $C \neq 1$ тогда, когда абсолютная реактивность программы при проведении тестов или статистических испытаний отличается от абсолютной реактивности при работе программы в реальных условиях. Если, например, за один час испытаний моделируется управляемый процесс, происходящий в реальных условиях в течение десяти часов, то коэффициент сжатия C принимается равным 10 [4].

¹ Это средняя продолжительность работы программного продукта между отказами. Для программных продуктов обычно подразумевается срок до полного перезапуска программы или полной перезагрузки операционной системы. Измеряется статистически, путём тестирования множества программ, или вычисляется методами теории надёжности

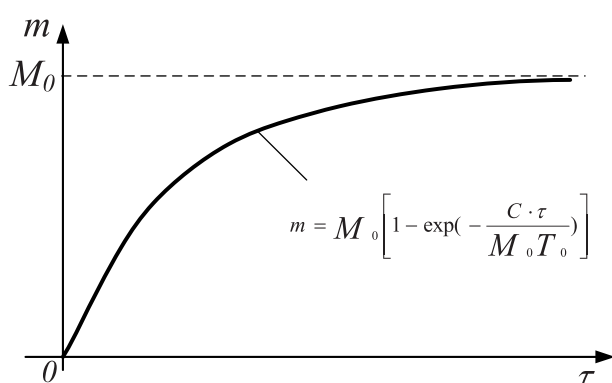


Рис. 2. Зависимость количества отказов от времени функционирования системы логического управления

2. Скорость обнаружения и устранения дефектов, измеряемая относительно времени работы программы, пропорциональна интенсивности отказов. Коэффициент пропорциональности $V = n/m$ называется *коэффициентом уменьшения дефектов* [4].

Количество зарегистрированных отказов m зависит от суммарного времени функционирования программы следующим образом:

$$m = M_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{C \cdot \tau}{M_0 T_0}\right) \right], \quad (3)$$

Значение средней наработки на отказ также зависит от суммарного времени функционирования:

$$T = T_0 \exp\left(\frac{C \cdot \tau}{M_0 T_0}\right) \quad (4)$$

Если в ходе испытания обнаруженные ошибки устраняются, то текущее значение средней наработки на отказ будет увеличиваться. Таким образом, в качестве критерия завершения испытания можно принять достижение требуемого (заданного) значения средней наработки на отказ T_τ . Тогда, определяя периодически текущее значение средней наработки на отказ по этой формуле, можно при планировании дальнейшего хода испытания рассчитать требуемое время для дальнейшего тестирования программы по формуле [4]:

$$\Delta\tau = \frac{M_0 T_0}{C} \ln\left(\frac{T_\tau}{T}\right) \quad (5)$$

Практические аспекты расчета математических критериев обнаружения ошибок в программном обеспечении. Рассмотрим описанные теоретические положения для практических расчетов при проведении тестовых испытаний. Ис-

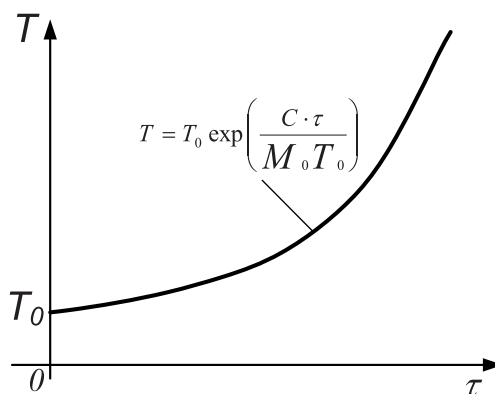


Рис. 3. Зависимость текущей средней наработки на отказ от времени функционирования системы логического управления

пользуем для этого процедуру проверки на наличие ошибок программы логического управления блока револьверной головки системы электроавтоматики обрабатывающего центра наклонной компоновки с ЧПУ СА535С10Ф4.

Описание объекта тестирования. Блок револьверной головки (РГ), как управляемый элемент станка, имеет входные переменные, представленные в *табл. 1*.

Так как все эти сигналы являются дискретными, то в качестве управляющего устройства, реализующего переключение состояний РГ, в нашем примере, используется программируемый логический контроллер (ПЛК). Программа логического управления для него составляется на языке функциональных блоков FBD.

Язык FBD является графическим языком и наиболее удобен для программирования процессов прохождения сигналов через функциональные блоки. Программа на языке FBD представляет собой совокупность функциональных блоков, которые соединяются линиями связи. Именно к такой программе логического управления и предлагается применить описанные выше математические критерии наряду с традиционно используемыми подходами (функциональное тестирование, нагрузочное тестирование, тестирование надежности и т.д.)

Расчет и построение кривой критерия интенсивности обнаружения ошибок. Критерий интенсивности обнаружения ошибок выражается формулой (1) $N(K) = 1 - n/K$, где n – суммарное количество обнаруженных и устраненных ошибок за число экспериментов K ; K – количество экспериментов. Проведем несколько экспериментов и зафиксируем количество ошибок, обнаруженных в каждом из них. Результаты исследований приведены в *табл. 2*.

График зависимости полученных опытных данных представлен на *рис. 4*.

Таблица 1

Входные и выходные сигналы блока револьверной головки

Входные сигналы	Выходные сигналы
Питание станка включено	Поместить инструмент в гнездо РГ (Карман)
Вращение барабана по часовой стрелке	Вращение барабана по часовой стрелке
Вращение барабана против часовой стрелки	Вращение барабана против часовой стрелки
Положение РГ в 0°	
Положение РГ в 90°	
Положение РГ в 180°	
Шпиндель работает	
Гнездо РГ свободно (Карман)	

Таблица 2

Сводная таблица по количеству проведенных тестовых испытаний и числу обнаруженных ошибок

n = 17							n = 12						
K	5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50	
n/K	3,4	1,7	0,85	0,57	0,43	0,34	2,4	1,2	0,6	0,4	0,3	0,24	
N(K)	-2,4	-0,7	0,15	0,43	0,57	0,66	-1,4	-0,2	0,4	0,6	0,7	0,76	
n = 8							n = 3						
K	5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50	
n/K	1,6	0,8	0,4	0,27	0,2	0,16	0,6	0,3	0,15	0,1	0,075	0,06	
N(K)	-0,6	0,2	0,6	0,73	0,8	0,84	0,4	0,7	0,85	0,9	0,925	0,94	

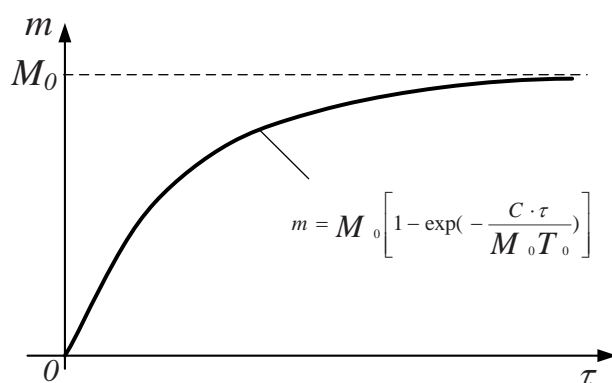


Рис. 4. Экспериментальные кривые критерия интенсивности обнаружения ошибок при различных значениях количества обнаруженных ошибок n

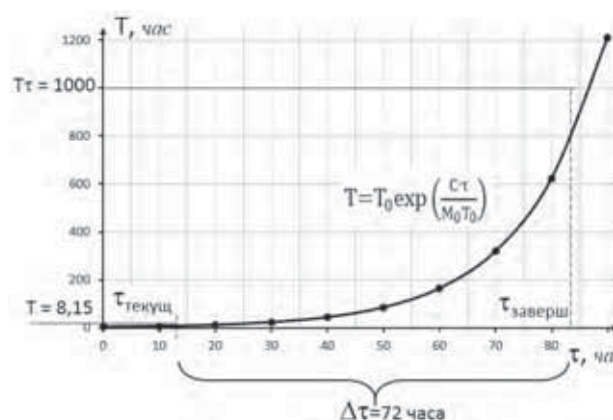


Рис. 5. Экспериментальная кривая зависимости средней наработки на отказ от времени функционирования системы логического управления

Таблица 3

Значения констант для расчета средней наработки на отказ

$T_0 = 3$	– средняя наработка на отказ в начале испытаний, час;
$C = 10$	– коэффициент сжатия тестов;
$M_0 = 50$	– общее количество дефектов, которое может проявиться за время эксплуатации программного средства;
$T_\tau = 1000$	– требуемое (заданное) значение средней наработки на отказ, критерий завершения испытаний, час;
$T = 8,15$	– текущее значение функции $T(\tau)$, час; определяется по формуле исходя из текущего момента времени испытаний $\tau = 15$ час, см. график на рис. 3.

Таблица 4

Значения опорных точек для графика кривой наработки на отказ

τ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
T	3	6	11	22	43	84	164	319	621	1210

В качестве критерия прекращения испытаний примем следующее условие: $N > 0,9$.

Как видно на графиках *рис. 4*, с уменьшением значения n кривая быстрее асимптотически стремится к 1, соответственно, чем больше n , тем достичь порогового значения, принятого равным 0,9, сложнее, и тем большее количество проверок K для этого потребуется. В нашем случае при $n = 3$ на пятидесятом тестовом испытании, значение критерия интенсивности, выраженного значением функции $N(K)$, становится равным 0,94 (*табл. 2*). $0,94 > 0,9$, следовательно, проверку работоспособности системы управления револьверной головкой по критерию интенсивности можно считать успешно завершённой.

Расчет необходимого времени испытаний для достижения требуемого значения наработки на отказ. Значение средней наработки выражается формулой (4), а требуемое время для дальнейшего тестирования программы по формуле (5).

Для расчета необходимого времени проверки программы для достижения заданной величины критерия завершения T_τ зададим значения аргументов формулы (5), выявленные экспериментально и представленные в *табл. 3*.

Тогда

$$\Delta\tau = \frac{M_0 T_0}{c} \ln \left(\frac{T_\tau}{T} \right) = \frac{50 \cdot 3}{10} \ln \frac{1000}{8,15} = 72 \text{ час.}$$

А график функции $T(\tau)$ построенный по контрольным расчетным точкам (*табл. 4*), будет выглядеть как представлено на *рис. 5*.

Полученное расчетное значение величины $\Delta\tau = 72$ часа есть время, которое необходимо продолжать производить тестирование программы для получения у проверенного программного продукта требуемого итогового значения наработки на отказ, равное 1000 часов.

Заключение

Для повышения эффективности испытания, его ускорения и уменьшения стоимости тестовых испытаний, как для ручного, так и для автоматизированного методов тестирования, необходимо использовать методы, средства и методики, позволяющие исключить влияние недостатков традиционных подходов к тестированию. Эта цель может быть достигнута путем применения специализированных математических критериев.

Применение критерия интенсивности обнаружения ошибок наиболее применимо в случае проведения ручного тестирования, так как результатом анализа в рамках данного критерия является порядковый номер итерации тестирования, после которого достигается требуемая степень безошибочности программного продукта.

Применение критерия заданного значения средней наработки на отказ на практике наиболее применимо для автоматизированного тестирования, так как данный критерий дает информацию о количестве времени, в течение которого необходимо продолжать прорабатывать программу через автоматически запускаемые тестовые сценарии, чтобы в результате получить систему с требуемым значением наработки на отказ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект FSFS-2023-0004).

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project FSFS-2023-0004.

Библиографический список

1. An approach to the development of logical control systems for technological equipment in the concept of Industry 4.0. / Nezhmetdinov R., Kovalev I., Chervonnova N., Nezhmetdinova R. and Al Khoury A. // ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03044 (2020). DOI: 10.1051/mateconf/202032903044.

2. Approach to Testing Logical Control Systems of Technological Equipment / Nezhmetdinov, R.A., Urinov, N.F., Derkach, E.V., Abdullaeva, D.H. // (2020) 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Far East Con 2020, статья № 9271361.

3. Extending the functional capabilities of NC systems for control over mechano-laser processing, Nezhmetdinov R. A., Sokolov S. V., Obukhov A.I., Grigor'Ev A. S., Automation and Remote Control. 2014. Т. 75. № 5. С. 945–952.

4. Кулаков, А.Ф. Управление качеством программных средств ЭВМ // Киев: Техника. – 1989 – С.169.

5. Кулиев, А.У. Разработка способа аппаратно-независимого управления электроавтоматикой для сокращения времени выпуска различных компоновок токарно-фрезерных станков с ЧПУ – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.06 / Кулиев, Абай Уангалиевич [Место защиты: Моск. гос. технол. ун-т «СТАНКИН»]. – Москва, 2016. – 134 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2856.

6. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А. Модульный подход к построению специализированной системы ЧПУ для обрабатывающих центров наклонной компоновки // СТИН. 2014. Т. 11. – С. 28–33.

7. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А. Специфика построения редактора управляющих программ электроавтоматики стандарта МЭК 61131 // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4 (31). – С. 127–132.

8. Мартинов, Г.М. Развитие систем управления технологическими объектами и процессами / Г.М. Мартинов // Мир техники и технологий. – 2009. – № 6. – С. 34–35.

9. Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. Практические аспекты применения программно-реализованного контроллера для управления электроавтоматикой вертикально-фрезерных станков Quaser MV184 // Автоматизация в промышленности, № 5. 2016. с. 14–17.

10. Нежметдинов, Р.А. Подход к построению систем логического управления технологическим оборудованием для реализации концепции «Индустрия 4.0» / Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, Н.Ю. Червоннова // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 5. – С. 5–9.

11. Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров, Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Мартинова Л.И., Автоматизация в промышленности. 2014. № 6. С. 25–28.

12. Принципы и методологические основы построения программных систем логического управления технологическим оборудованием: автореферат диссертация на соискание ученой степени д-ра тех. наук: 05.13.06, / Нежметдинов Рамиль Амирович. – Москва, 2020. – 43 с.

13. Роберт Калбертсон, Крис Браун, Гэри Кобб. Быстрое тестирование: [Пер. с англ.]. – М. [и др.]: Серия института качества программного обеспечения – Вильямс, 2002., 383 с. с ил., табл. – ISBN 5-8459-0336-х.

References

1. An approach to the development of logical control systems for technological equipment in the concept of Industry 4.0. / Nezhmetdinov R., Kovalev I., Chervonnova N., Nezhmetdinova R. and Al Khoury A. // ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03044 (2020). doi: 10.1051/mateconf/202032903044.

2. Approach to Testing Logical Control Systems of Technological Equipment / Nezhmetdinov, R.A., Urinov, N.F., Derkach, E.V., Abdullaeva, D.H. // (2020) 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Far East Con 2020, статья № 9271361.

3. Extending the functional capabilities of NC systems for control over mechano-laser processing, Nezhmetdinov R.A., Sokolov S.V., Obukhov A.I., Grigor'Ev A.S., Automation and Remote Control. 2014. Т. 75. № 5. – С. 945–952.

4. Kulakov, A.F. Quality management of computer software // Kiev: Tehnika. – 1989 – p. 169.

5. Kuliyeu, A.U., Development of a method of hardware-independent control of electroautomatics to reduce the release time of various layouts of CNC turning and milling machines – dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.13.06 / Kuliyeu, Abai Wangalievich [Place of defense: Moscow State Technol. un-t «Stankin»]. – Moscow, 2016. – 134 p.: ill. RGB OD, 61 09-5/2856.

6. Martinov G.M., Nezhmetdinov R.A. Modular approach to the construction of a specialized CNC system for machining centers of inclined layout//STIN. 2014. Vol. 11. pp. 28–33.

7. Martinov G.M., Nezhmetdinov R.A., Niki-shechkin P.A. Specifics of the construction of the editor of control programs of electroautomatics of the IEC 61131 standard//Bulletin of Vestnik MSUT “STANKIN”. 2014. №. 4 (31). pp. 127–132.

8. Martinov, G.M. Development of control systems for technological objects and processes / G.M. Martinov // World of Technology and Technologies. – 2009. – № 6. – pp. 34–35.

9. Nezhmetdinov R.A., Nikishechkin P.A., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Practical aspects of the application of a software-implemented controller for controlling electroautomatics of vertical milling machines Quaser MV184 // Automation in industry, №. 5. 2016. pp.14–17.

10. Nezhmetdinov, R.A. Approach to the construction of logical control systems technological equipment management for the implementation of the concept «Industry 4.0» / R.A. Nezhmetdinov, P.A. Nikishechkin, I.A. Kovalev, N.Y. Chervonnova // Automation in industry. – 2017. – № 5. – p. 5–9.

11. Construction of a specialized CNC system for multi-coordinate turning and milling machining centers, Nezhmetdinov R.A., Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Martinova L.I., Automation in industry. 2014. №. 6. pp. 25–28.

12. Principles and methodological foundations of building software systems for logical control of technological equipment: abstract dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.13.06, / Nezhmetdinov Ramil Amirovich. – Moscow, 2020. – 43 p.

13. Robert Culbertson, Chris Brown, Gary Cobb. Quick testing: [Trans. from English] M. [et al.]: Series of the Institute of Software Quality – Williams, 2002, – 383 p. with ill., Table. – ISBN 5-8459-0336-x.

Нежметдинов Рамиль Амирович – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

neramil@gmail.com

Путинцева Елена Валентиновна – старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

derkach.e.v@yandex.ru;

Чумак Ростислав Русланович – аспирант кафедры компьютерных систем управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

chumakrr@gmail.com

Nezhmetdinov Ramil Amirovich – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Computer control systems” of MSUT “STANKIN”

neramil@gmail.com;

Putintseva Elena Valentinovna – senior lecturer at the sub-department of “Computer control systems” of MSUT “STANKIN”

derkach.e.v@yandex.ru;

Chumak Rostislav Ruslanovich – postgraduate student at the sub-department of “Computer control systems” of MSUT “STANKIN”

chumakrr@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 658.5:004.9

ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ С КЛИЕНТАМИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ

А.В. Быкова, А.В. Капитанов
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

В данной статье проведен обзор классической архитектуры взаимодействия автоматизированных систем предприятия и позиционирования системы взаимоотношений с клиентами в ИТ-инфраструктуре современного предприятия. Выделены критерии анализа предприятия для оценки целесообразности внедрения CRM-системы. Рассмотрены варианты интеграции CRM-системы со смежными автоматизированными системами (АС) предприятия и выявлены области пересечения функциональных возможностей систем. На основании проведенного анализа, а также привлечения теоретических знаний из научной литературы, в статье приводится обоснование важности применения системного подхода и анализа деятельности предприятия в целом перед внедрением системы взаимоотношений с клиентами на предприятии.

Ключевые слова: системный анализ, жизненный цикл изделия, АСУП, CRM-система.

INTERACTION BETWEEN CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT SYSTEM AND AUTOMATED ENTERPRISE SYSTEMS ON THE VARIOUS STAGES OF THE PRODUCT LIFE CYCLE

A.V. Bykova, A.V. Kapitanov
MSUT "STANKIN"

Abstract

This article provides an overview of the classical architecture of automated enterprise systems interaction and the customer relationship system positioning in the IT infrastructure of a company. The criteria for the analysis of the company to implementing a CRM-system are presented. Variants of integration of the CRM-system with interconnected AS of the company are considered and the intersection areas of the functional capabilities of the systems are identified. Based on the analysis and the academic literature, the article provides the evidence for the applying the systematic approach and analyzing activities of the whole company before implementing of the customer relationship management system on a company.

Keywords: system analysis, product life cycle, automated enterprise management system, CRM-system.

Выбор и внедрение на предприятии оптимальной системы взаимоотношений с клиентами является трудоемким и затратным мероприятием, требующем от группы внедрения не только технических навыков внедрения системы как программного продукта, но и значительного предварительного анализа функционирования бизнес-процессов предприятия и взаимосвязи этих процессов с существующей архитектурой программных комплексов управления предприятием.

Рассматривая задачу внедрения автоматизированной системы управления взаимоотношениями с клиентами на функционирующем предприятии, важно применять системный подход и рассматривать деятельность предприятия в целом. Необходимо учитывать вид деятельности, задачи и масштаб предприятия, особенности выпускаемой продукции или оказываемых услуг, компьютерное сопровождение и внедренный программно-аппаратный комплекс управления предприятием [7]. Иными словами, необходимо раскрыть «черный ящик» области внедрения системы, используя системный подход. «Системный подход является отдельным направлением методологии научного познания и социальной практики, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем. Это ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта, выявление многообразных типов связей в нем и сведение их в единую теоретическую картину» [3]. От эффективности системного анализа предприятия будет зависеть удовлетворенность инициаторов внедрения автоматизированной системы и ее пользователей, а также соответствие внедряемой системы потребностям производства. В системном анализе часто можно заметить эмерджентность системы, т.е. закономерность увеличения количества различий свойств всей системы в целом от свойств частей системы в процессе ее усложнения. Применительно к предприятию, чем больше рассматриваемая организация, тем значительнее будут влиять зависимости между ее компонентами на всю деятельность компании и перспективы ее развития в будущем.

Анализ деятельности предприятия рационально начать с рассмотрения жизненного цикла изделия и влияния внедряемой системы на его этапы. В классической модели этапов жизненного цикла продукции рассматриваются все производственные процессы от возникновения идеи, выпуска изделия до его постпроизводственного сопровождения и дальнейшей утилизации.

Этапы жизненного цикла:

1. Осмысление потребности;
2. Исследование и анализ осуществимости;
3. Проектирование и конструирование;

4. Подготовка производства (подготовка к реализации);

5. Изготовление;

6. Эксплуатация;

7. Утилизация [8].

В современном мире быстро развивающихся технологий во многом производительность предприятия и востребованность предоставляемых им услуг зависят от технической и информационной обеспеченности предприятия. Использование цифровых технологий и переход к цифровому производству значительно повышает эффективность процессов производства и организует информационный обмен между всеми процессами в цифровом виде [2]. На каждом этапе жизненного цикла изделия существует потенциальная возможность автоматизации его бизнес-процессов, используя современные автоматизированные системы. Уровень информационного обеспечения, цифровизации и автоматизации бизнес-процессов предприятия не может быть навязан извне и носить обязательный характер. Решение о внедрении таких систем принимается руководством компании и службой качества предприятия по результатам регулярного системного анализа бизнес-процессов компании и маркетинговых составляющих производства. Рассмотрим более детально жизненный цикл заказного изделия как основной бизнес-процесс производства. На *рис. 1* приведен жизненный цикл изделия, системы автоматизации этапов жизненного цикла и взаимосвязи между ними.

В соответствии с терминологией ГОСТ 34.003-90 среди автоматизированных систем можно выделить группы систем в зависимости от вида деятельности и вида управляемого объекта [1]. Среди наиболее актуальных систем автоматизации этапов производства можно выделить САПР (система автоматизированного проектирования), АСПП (автоматизированная система технологической подготовки производства), АСУТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) и АСУП (автоматизированные системы управления предприятием). На *рис. 1* представлены следующие АСУП: система планирования ресурсов и организационного управления предприятием (ERP – Enterprise Resource Planning), система электронного документооборота (ECM – Enterprise Content или EDM – Enterprise Document Management) и система управления обслуживанием и взаимоотношениями с заказчиками (CRM – Customer Relationship Management). В мировой практике CRM-системы применяются для учета, контроля и оптимизации взаимоотношений с клиентами на этапах постпроизводственного сопровождения выпускаемого изделия – этапы «Продажа / Монтаж и наладка»



Рис. 1. Жизненный цикл изделия

и «Эксплуатация / Постпроизводственное сопровождение и обслуживание», показанных на *рис. 1*. В процессе постпроизводственного сопровождения продукции необходимо иметь привязку к сопровождаемому изделию и его гарантийным условиям. Поэтому CRM-система связана с этапом «Производство» и может иметь виртуальную связь по идентификатору изделия или может быть интегрирована с программным комплексом учета изделий этапа «Производство» (базы данных / ERP-системы и пр.). При отсутствии иных

систем учета CRM-система может сама послужить базой данных для учета выпущенных изделий.

Под изделием можно понимать как физическое изделие (детали, сборочные единицы, готовые машины, оборудование) машиностроительного производства, так и версию программного обеспечения или программного модуля, выпускаемого ИТ-компанией. Для CRM-системы будут важны следующие показатели изделия, представленные в *табл. 1*.

Таблица 1

Основные показатели изделия в CRM

Изделие машиностроительного производства	Изделие ИТ-компании
Серийный номер изделия	Номер лицензии / ключа аппаратной защиты
Номер партии	Версия ПО
Название изделия	Название ПО
Модель изделия	Компоненты ПО
Комплектация	Модель устройства (для установки ПО)
Транспортная упаковка	Версия ОС (или другие требования к среде эксплуатации)
Статус готовности	Статус готовности
Плановая дата выпуска	Плановая дата выпуска
Дата выпуска (фактическая)	Дата выпуска (фактическая)
Дата поставки (продажи)	Дата продажи / поставки
Гарантийный срок	Гарантийный срок / количество обращений за консультацией
Номер договора	Тип гарантийного обслуживания (отладка / исправление ошибок / консультация / 1-ая линия поддержки и пр.)
Номер заказа / заявки	Номер договора
Место размещения на складе	Номер заказа / заявки

В классической модели этапов жизненного цикла изделия [8] первым этапом считается осмысление потребности. Это может быть инициатива маркетинговых служб предприятия или руководства компании, либо потребность в выпуске изделия может быть инициирована в виде предзаказа со стороны потенциального клиента. Поэтому наличие этапа «Предзаказ изделия» может быть вариативное и зависеть непосредственно от особенностей производства. Для заказного изделия на этапе «Предзаказ изделия» происходит подписание договора на выполнение работ, либо оформление заявки / заказа в рамках уже действующих договоров. Этап «Предзаказ изделия» может сопровождаться выставлением счетов и оплатой заказа или его части, поэтому на этом этапе задействованы сотрудники отдела продаж, отдела логистики, бухгалтерии, склада и производства. На рис. 2 представлена блок-схема бизнес-процесса «Предзаказ изделия» и задействованные АСУП.

Центральной точкой взаимодействия АСУП является взаимодействие ERP и CRM-систем. Внедрение этих систем на предприятии движется единой целью автоматизации и оптимизации выполнения организационных и административных бизнес-процессов производства. Однако задачи и способы решения этих задач у них разные.

ERP-система (Enterprise Resource Planning) – это система планирования ресурсов и финансово-организационного управления предприятием. ERP-система является связующим звеном всех подразделений предприятия: маркетингового отдела, отдела продаж, производства, отдела логистики, складских подразделений, бухгалтерии, договорных отделов и пр. Т.е. она координирует практически весь процесс финансово-управленческого сопровождения жизненного цикла производства изделия от его заказа / инициирования до его передачи клиенту. Основные показатели изделия вносятся в систему

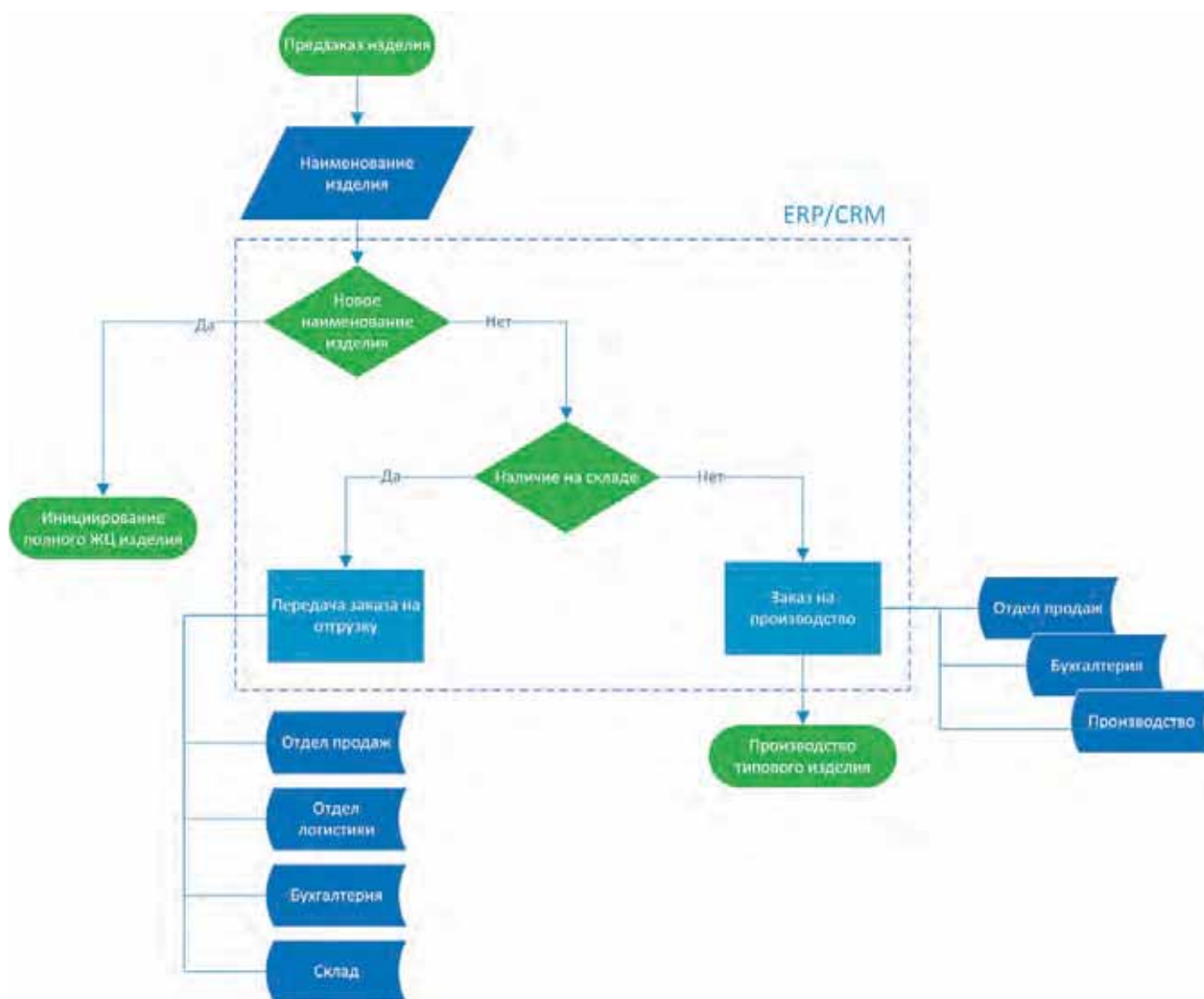


Рис. 2. Блок-схема «Предзаказ изделия»

один раз и доступны для работы всех подразделений предприятия в соответствии с ролями и правами доступа к системе. Большинство современных ERP-систем имеют расширение в виде блока ведения электронного документооборота компании с тесной интеграцией между собой. Применение встроенных средств документооборота рационально для предприятий, где первоначальной потребностью было внедрение системы планирования ресурсов предприятия, и лишь по прошествии времени возникла необходимость в переходе на электронный документооборот компании. Такой подход применим на заводах и машиностроительных производствах, когда ключевое значение имеют процессы производства, снабжения, логистики и хранения физических изделий, а документооборот является сопроводительным бизнес-процессом.

В настоящее время значительно выросло количество поставщиков различных товаров и услуг, что в свою очередь стимулирует поставщиков уделять более пристальное внимание качеству выпускаемой продукции, ее конкурентоспособности и долговечности использования. Продукция, предлагаемая клиентам, перестает быть уникальной и иметь локального производителя. Как правило, существуют аналоги товаров, производимые по всему миру. Клиент – покупатель продукции, перестает быть безликим и является частью «массового потребителя», этот образ сменяет клиент как индивидуальный заказчик, удовлетворенность которого зависит от удобства и быстроты его обслуживания [6]. Срок эксплуатации и удовлетворенность пользователей изделия во многом зависит не только от качества самого изделия, но и от услуг постпроизводственного сопровождения.

Услуги постпроизводственного сопровождения изделия:

- монтаж, установка, настройка и наладка;
- обучение пользователей / эксплуатационного персонала;
- консультирование пользователей / эксплуатационного персонала;
- ремонт и исправление ошибок / дефектов.

Целью внедрения CRM-системы является автоматизация и оптимизация деятельности отдела продаж / маркетингового отдела и отделов постпроизводственного сопровождения (сервисного отдела и отделов консультирования / сопровождения). CRM-система помогает организовать и структурировать деятельность, основанную на телефонной коммуникации с пользователями, переписках по электронной почте, встречах, помогает привлечь новых клиентов и выстроить эффективные и долгосрочные отноше-

ния с постоянными клиентами. Особенно актуально это в торгово-оптовой сфере, где объемы производства и продаж зависят напрямую от долгосрочных взаимоотношений с клиентами.

Основная функциональность CRM-систем:

- автоматизация продаж;
- автоматизация маркетинга;
- поддержка и сопровождение клиентов;
- управление контактами (в т.ч. клиентами) и контрагентами;
- ведение общего делопроизводства (электронный документооборот компании);
- интеграция с АСУ предприятия.

Рассматривая предприятие как совокупность бизнес-процессов, стоит отдельно рассмотреть процесс документооборота компании, который затрагивает бухгалтерскую, кадровую, административную, управленческую и производственную документацию. Производственный и административный документооборот связан с жизненным циклом производства изделия в части оформления предзаказа изделия, непосредственного производства изделия и его постпроизводственного сопровождения. Для автоматизации процесса документооборота на предприятии внедряются СЭД (СЭДО) – системы электронного документооборота (EDMS – Electronic Document Management Systems) или системы более широкого назначения – ECM-системы (Enterprise Content Management). Под ECM-системой понимают набор технологий, инструментов и методов, используемых для сбора, управления, накопления, хранения и доставки информации (контента) всем потребителям внутри организации. «Например, для того чтобы стать ECM-системой, СЭДО должна содержать средства сканирования документов, гарантировать сохранность документов, поддерживать правила хранения документов и так далее» [5]. В российской практике под ECM часто понимают СЭДО, как более узкое понятие.

Областью деятельности EDM-систем является:

- задачи общего делопроизводства компании (управление входящими / исходящими / внутренними документами / поручениями);
- делопроизводство кадрового отдела / бухгалтерии;
- ведение архивов документов (документы завершающего этапа жизненного цикла производства);
- коллегиальные документы (предварительные и результирующие документы повесток дня / собраний / совещаний / заседаний совета директоров и пр.);
- управление взаимоотношениями с клиентами (т.е. ограниченный функционал CRM-систем) и построение отчетов.

Большинство современных CRM и ERP-систем также имеют расширения в виде дополнительных блоков ведения электронного документооборота и встроенные механизмы их интеграции. Из анализа функциональности CRM, ERP и EDM-систем можно выделить смежные области деятельности систем, центральным функционалом пересечения которых являются задачи общего делопроизводства компании. На *рис. 3* наглядно представлены области пересечения функционала CRM, ERP и EDM-систем.

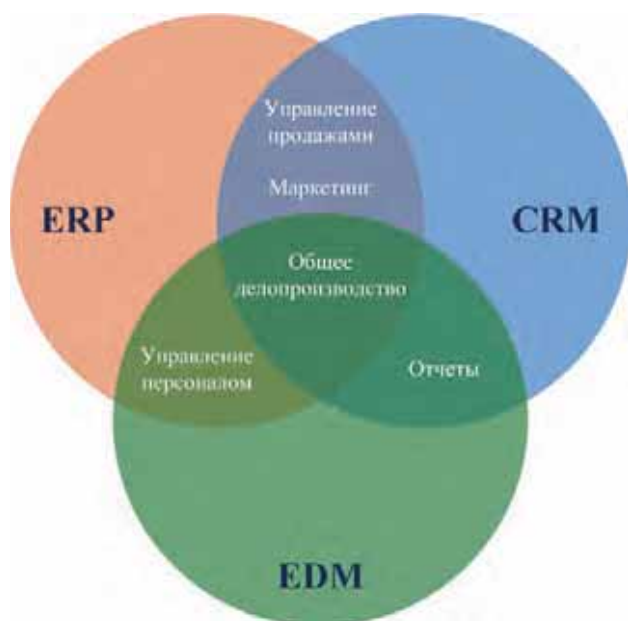


Рис. 3. Функциональность CRM, ERP и EDM-систем

При выборе оптимальных средств автоматизации процессов управления предприятием и стратегии их внедрения, кроме непосредственно самих бизнес-процессов предприятия, анализируются многие параметры работы предприятия и его специфика:

1. Вид промышленности предприятия или отрасль деятельности (отрасль ИТ, банковской и экономической деятельности, отрасль металлообработки и машиностроения, отрасль энергетики и нефтедобычи, сельскохозяйственная, пищевая, легкая промышленность и др.);
2. Масштаб предприятия:
 - количество рабочих мест (потенциальные пользователи системы).
3. Объем выпуска продукции
 - штучное производство;
 - серийное производство;
 - массовое производство.

4. Объем заказов, договоров и поставок за месяц или год.

5. Специфика выпускаемой продукции / предоставляемых услуг:

- мелкое изделие (детали, сборочные единицы, комплексы, комплекты);
- готовая продукция (станок, авиа- и автопром, электротехническое оборудование и др.);
- услуги;
- программное обеспечение (программа, программный блок).

6. Окружение внедряемой системы и ИТ-инфраструктура предприятия (внедренные программные комплексы, информационное обеспечение предприятия).

Большинство современных решений в области автоматизированных систем управления предприятием имеют расширения в виде дополнительных пакетов смежных возможностей, с помощью которых можно управлять основными бизнес-процессами предприятия с помощью одной АСУП. Но все дополнительные пакеты имеют ограниченный функционал, который сложно адаптировать и оптимизировать под нужды крупного предприятия.

Для крупных производств и предприятий оптимальным решением является внедрение профильной системы в каждой группе бизнес-процессов: ERP-система для финансово-управленческих процессов, EDM-системы для документооборота и CRM-система для управления взаимоотношениями с клиентами. Для более мелких компаний внедрение крупной ERP-системы, как наиболее универсальное средство управления предприятием, может быть очень длительным и дорогостоящим, поэтому оптимальнее использовать «коробочные» решения EDM и CRM-систем с их последующей настройкой и адаптацией под нужды предприятия.

Любая организация имеет свою специфику деятельности и уникальные бизнес-процессы, поэтому предварительный анализ бизнес-процессов организации позволит выстроить контролируемый процесс управления предприятием, выявить слабые места, требующие своевременной оптимизации и подобрать оптимальную автоматизированную систему управления предприятием. Автоматизированные системы управления предприятием это не цель, а современные средства и технические возможности организации эффективного и успешного процесса управления и контроля деятельности подразделений предприятия.

Библиографический список

1. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2009 г. с Поправкой (ИУС 1-2003). – 15 с.
2. Андреев В.Н., Баранов В.В., Бурдина А.А., Лукина С.В., Коршунова Е.Д., Окоракова А.А., Фролов Е.Б. Управление устойчивым развитием промышленности в условиях цифровизации. Монография / Андреев В.Н., Баранов В.В., Бурдина А.А., Лукина С.В., Коршунова Е.Д., Окоракова А.А., Фролов Е.Б. Москва: Янус-К, 2022. – 119 с.
3. Блауберг И.В., Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Системный подход // Новая философская энциклопедия / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; – 2-е изд., испр. и допол. – М.: Мысль, 2010.
4. Зараменских Е.П. Управление жизненным циклом информационных систем: монография / Е.П. Зараменских. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – 270 с.
5. Коржук В.М., Попов И.Ю., Воробьева А.А. Защищенный документооборот. Часть 1: Учебно-методическое пособие / Коржук В.М., Попов И.Ю., Воробьева А.А., – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 67 с.
6. Мартынов О.Ю. Особенности подготовки производства наукоемких изделий. Монография. – М.: Янус-К, 2012, – 80 с.
7. Соломенцев Ю.М., Павлов В.В. Моделирование производительных систем в машиностроении. / Соломенцев Ю.М., Павлов В.В. – М.: Янус-К, 2010, – 228 с.
8. Тюрбеева Т.Б., Стоякова К.Л., Волкова Г.Д. Введение в базы данных: учеб. пособие / Т.Б. Тюрбеева, К.Л. Стоякова, Г.Д. Волкова. – М.: Янус-К, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021. – 80 с.
9. Шептунов С.А. Жизненный цикл продукции / С.А. Шептунов. – М.: Янус-К, 2003 (ИПД Триальфа). – 244 с.

Быкова Анна Владимировна – аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

balabolik@mail.ru

Капитанов Алексей Вячеславович – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

av.kapitanov@stankin.ru

Bykova Anna Vladimirovna – postgraduate student at the sub-department of «Automated information processing and management systems», MSUT “STANKIN”

balabolik@mail.ru

Kapitanov Alexey Vyacheslavovich – D.Sc. of Engineering, Head of the sub-department of «Automated information processing and management systems», MSUT “STANKIN”

av.kapitanov@stankin.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

References

1. GOST 34.003-90. Information technology. A group of standards for automated systems. Automated systems. Terms and definitions. – Official edition. – Moscow: Standartin form, 2009 with an add. (IUS 1-2003). – 15 p.
2. Andreev V.N., Baranov V.V., Burdina A.A., Lukina S.V., Korshunova E.D., Okorakova A.A., Frolov E.B. Managing the sustainable development of industry in the context of digitalization. Monograph / Andreev V.N., Baranov V.V., Burdina A.A., Lukina S.V., Korshunova E.D., Okorakova A.A., Frolov E.B. – Moscow: Janus-K, 2022. – 119 p.
3. Blauberger I.V., Sadovskiy V.N., Yudin E.G. System concept // New philosophy encyclopedia / RAS philosophy university; Nat. community. – Scientific foundation; – 2nd rev., cor. and add. – M.: Mysl, 2010.
4. Zaramenskih E.P. Lifecycle management of information system: monograph / E.P. Zaramenskih. – Novosibirsk: Publisher CRNS, 2014. – 270 p.
5. Korzhuk V.M., Popov I.Y., Vorobyova A.A. Security EDM. Part 1: Educational and methodical manual / Korzhuk V.M., Popov I.Y., Vorobyova A.A., – St.P.: University ITMO, 2021. – 67 p.
6. Martynov O.Y. Features of the preparation of the production of high-tech products. Monograph. – M.: Janus-K, 2012, – 80 p.
7. Solomencev Y.M., Pavlov V.V. Modeling of productive systems in mechanical engineering. / Solomencev Y.M., Pavlov V.V. – M.: Janus-K, 2010, – 228 p.
8. Turbeeva T.B., Stoyakova K.L., Volkova G.D. Introduction to Databases: edu. textbook / T.B. Turbeeva, K.L. Stoyakova, G.D. Volkova. – M.: Janus-K, MSTU STANKIN, 2021. – 80 p.
9. Sheptunov S.A. Product life cycle / S.A. Sheptunov. – M.: Janus-K, 2003 (IPD Trialfa). – 244 p.

УДК 658.512.6

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ОБЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ОСОБО ОТВЕТСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ С ДАЛЬНЕЙШИМ ПЛАНИРОВАНИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА

М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

В статье указано, что на сегодняшний день актуальным является повышение качества изготавливаемой продукции, а также исполнение сроков ее сдачи заказчику на предприятиях мелкосерийного типа производства. Определено, что для снижения количества дефектной продукции необходимо внедрить высокоточное измерительное оборудование после ответственных операций технологического процесса, что путем обнаружения потенциальных несоответствий и последующего их исправления, позволит обеспечить выполнение требований, установленных в нормативно-технической документации. Установлено, что при помощи получения информации о выявленных несоответствиях появляется возможность заново рассчитать производственное расписание, что позволит выполнить требования сроков поставки партии деталей.

Ключевые слова: мелкосерийное производство, MES-система, особо ответственная технологическая операция, высокоточное измерительное оборудование, планирование производственного расписания.

THE INFLUENCE OF THE INDICATOR OF THE OVERALL EFFICIENCY OF EQUIPMENT ON THE CONTROL OF PARTS AFTER A SPECIAL RESPONSIBLE TECHNOLOGICAL OPERATION WITH FURTHER PLANNING OF THE PRODUCTION SCHEDULE AT SMALL-SCALE ENTERPRISES

M.A. Shutikov, A.N. Feofanov
MSUT "STANKIN"

Abstract

The article states that today it is relevant to improve the quality of manufactured products, as well as the fulfillment of the deadlines for its delivery to the customer at small-scale production enterprises. It is determined that in order to reduce the number of defective products, it is necessary to introduce high-precision measuring equipment after critical operations of the technological process, which, by detecting potential inconsistencies and their subsequent correction, will ensure compliance with the requirements established in the regulatory and technical documentation. It is established that by obtaining information about the identified inconsistencies, it becomes possible to recalculate the production schedule, which will allow meeting the requirements of the delivery time of the batch of parts.

Keywords: small-scale production, MES-system, especially responsible technological operation, high precision measuring equipment, production schedule planning.

В связи с сегодняшними реалиями, особое внимание на предприятиях с производством мелкосерийного типа уделяется повышению качества изготавливаемой продукции, а также исполнению сроков ее сдачи заказчику [1, 2]. Выполнение этих требований напрямую влияет на конкурентоспособность предприятий и повышает шансы на получение заказов, в том числе и государственных.

Одним из показателей, который характеризует эффективность использования технологического оборудования на производственных операциях, является показатель OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), в состав которого входит коэффициент качества. Формула расчета показателя OEE имеет следующий вид:

$$OEE = K_{вр} K_{пр} K_{кач} = \frac{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j] \sum_i [T_i Выр_i] \sum_i [T_i (Выр_i - Б_i)]}{\sum_j [\Phi_{врj}] \sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j] \sum_i [T_i Выр_i]} \quad (1)$$

где j – количество единиц оборудования; $\Phi_{врj}$ – фонд времени работы j -ой единицы оборудования (длительность смены, иногда берут 24 часа в сутки); $Пр_j$ – простой j -ой единицы оборудования, в том числе и плановые (обеда, регламентированные перерывы, ППР, наладка и т.д.); i – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования, T_i – такт выпуска i -ого продукта, $Выр_i$ – количество изготовленного i -ого продукта в течение $\Phi_{врj}$; $Б_i$ – количество брака i -ого продукта изготовленного в течение $\Phi_{врj}$; $\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]$ – количество времени, имеющегося для выпуска продукции на j -ой единице оборудования; $\sum_i [T_i Выр_i]$ – количество времени, потраченного на производство продукции; $\sum_i [T_i (Выр_i - Б_i)]$ – количество времени, потраченного на производство годной продукции.

При изготовлении изделий могут быть обнаружены такие не-

соответствия, как выход за технологические допуски, необеспечение заданной соосности, перпендикулярности, плоскостности и другие, что в дальнейшем не позволит произвести сборочные операции по технологическому процессу и повлечет за собой невыполнение требований, указанных в нормативно-технической документации [3]. Это может быть связано с отсутствием проведения контроля после особо ответственных технологических операций при изготовлении деталей. Для этого необходимо после особо ответственных технологических операций внедрить высокоточное измерительное оборудование, например, координатно-измерительную машину, которая дает возможность провести контроль заданных допусков расположения поверхностей [4]. Для этого необходимо при написании технологического процесса в системе автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) определить особо ответственную технологическую операцию [5]. После этого, полученные данные о таких составляющих, как время выполнения производственных операций и их последовательность, данные о технологическом и измерительном оборудовании, представленные на *рис. 1*, интегрируются в MES-систему (*Manufacturing Execution System*), которая позволяет произвести перерасчет производственного расписания.

На основании полученных данных от высокоточного измерительного оборудования, контролер

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДОКУМЕНТА													
№	Сек	Уч	ЭМ	Обер.	Наим.	СМ	Проф	Р	УТ	ЭФ	КОД	ЭВ	
Б 01					Верстак							2	15
А 02					090 4114 Токарно-винторезная								
Б 03					Токарно-винторезный станок 16К20							5	45
А 04					095 0108 Слесарная								
Б 05					Верстак слесарный							1	12
А 06					100 4221 Горизонтально-расточная								
Б 07					Горизонтально-расточной станок 08 В							3	30
А 08					105 0108 Слесарная								
Б 09					Верстак слесарный							1	9
А 10					110 0106 Выдержка								
Б 11					Остатки для измерения детали						10		90
А 12					115 0235 Контроль								
Б 13					соосности(концентр-ти)								
Б 14					Координатно-измерительная машина						10	3	20
А 15					120 4114 Токарно-винторезная								
Б 16					Токарно-винторезный станок 16К20							5	45
А 17					125 4268 Гравировально-фрезерная								
МК													5

Рис. 1. Фрагмент технологической карты, сформированной в системе автоматизированного проектирования технологического процесса

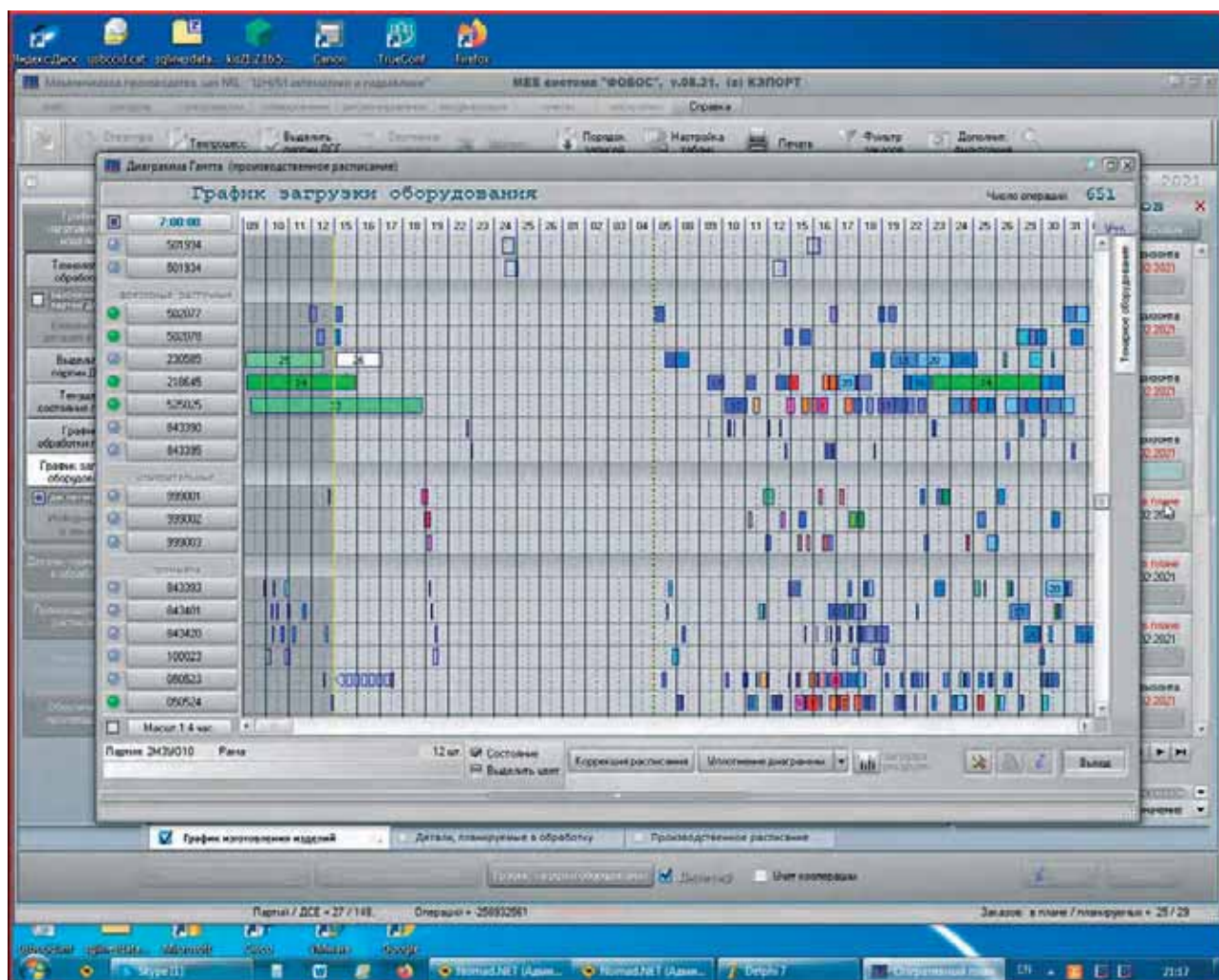


Рис. 2. Фрагмент производственного расписания, формируемого MES-системой «ФОБОС» по результатам информации, поступающей от КИМ и САПР ТП

вносит в MES-систему информацию о выявленном дефекте, обнаруженном после ответственной технологической операции, после чего детали либо изготавливаются заново, либо происходит их доработка [6]. Далее формируется перерасчитанное производственное расписание, визуализируемое в виде диаграммы Ганта, приведенное на рис. 2.

Это позволит при последовательном методе производства, который используется на предприятиях мелкосерийного типа, реализовать один из следующих возможных вариантов: либо, если срок сдачи партии позволяет и есть свободное технологическое оборудование, дефект исправляется или изготавливается недостающее количество деталей, либо необходимое количество деталей берется из следующей аналогичной изготавливаемой партии деталей [7].

Применение такого метода позволит повысить показатель эффективности технологического оборудования за счет увеличения значения коэффициента качества, входящего в него, благодаря компенсации количества дефектных деталей, что в свою очередь позволит минимизировать издержки и обеспечить исполнение поставленных сроков на изготовление продукции.

Библиографический список

1. Шутиков М.А. Повышение эффективности выпуска годной продукции путем внедрения в технологический процесс координатно-измерительной машины после ответственной операции с дальнейшей загрузкой в MES-систему / М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов, Е.Б. Фролов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2021. – № 4(59). – С. 41–43. – EDN UDLION.

2. Шутиков М.А. Повышение эффективности работы ОТК на основе интеграции базы данных результатов контроля с системами оперативного планирования категории MES / А.Н. Феофанов, Е.Б. Фролов, В.В. Крюков, М.А. Шутиков // *Технология машиностроения*. – 2020. – № 12. – С. 61–64.

3. Шутиков М.А., Пономарев К.С. Применение MES-систем для контроля геометрических параметров подшипников / М.А. Шутиков, К.С. Пономарев // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»* – 2018. – № 4 (47). – С. 119–121 – EDN YUMZVJ.

4. Базров Б.М., Фролов Е.Б., Арзыбаев А.М., Сахаров А.В., Крюков А.В., Тимофеев Д.Е., Тришкин А.С. Автоматизированное проектирование технологии и формирование групп оборудования на основе интеграции САПР ТП и MES на принципах модульной технологии // *Станочный парк*. – 2011. – № 8. – С. 66–73.

5. Фролов Е.Б. MES-системы: оперативный функционально-стоимостной анализ для нужд производственного предприятия // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*. 2008. № 9. С. 76–79.

6. Шутиков М.А. Внедрение координатно-измерительной машины после ответственной операции с использованием MES-системы как способ минимизации количества дефектных деталей при изготовлении изделий / М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2021. – № 9–1(111). – С. 79–84. – DOI 10.23670/IRJ.2021.9.111.012.

7. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б. «Цифровой двойник» производственной системы – перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия // *Станочный парк*. 2018. № 8. С. 36–39.

Шутиков Михаил Александрович – аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

mi.shutikov93@yandex.ru

Феофанов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

feofanov.fan1@yandex.ru

Shutikov Mikhail Aleksandrovich – postgraduate student at the sub-department of «Automated information processing and control systems», MSUT “STANKIN”

mi.shutikov93@yandex.ru

Feofanov Alexandr Nikolaevich – D.Sc. of Engineering, Full Professor, Professor at the sub-department of “Engineering Graphics”, MSUT “STANKIN”

feofanov.fan1@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

References

1. Shutikov M.A. Improving the efficiency of the production of suitable products by introducing a coordinate measuring machine into the technological process after a responsible operation with further loading into the mes system. / M.A. Shutikov, A.N. Feofanov, E.B. Frolov // *Vestnik MSUT «STANKIN»*, 2021, № 4(59), pp. 41–43, EDN UDLIOH.

2. Improving the efficiency of the quality control department based on the integration of the database of control results with the operational planning systems of the MES category/ A.N. Feofanov, E.B. Frolov, V.V. Kryukov, M.A. Shutikov. *Technology of manufacturing*, 2020, № 12, – pp. 61–64.

3. Shutikov M.A., Ponomarev K.S. Application of MES-systems for control of geometrical parameters of bearings. / M.A. Shutikov, K.S. Ponomarev // *Vestnik MSUT «STANKIN»*, 2018, № 4 (47), pp. 119–121, EDN YUMZVJ.

4. Bazrov B.M., Frolov E.B., Arzybaev A.M., Sakharov A.V., Kryukov A.V., Timofeev D.E., Trishkin A.S. Automated design of technology and formation of equipment groups based on CAD TP and MES integration on principles of modular technology // *Machinery Equipment*. – 2011. – № 8. – pp. 66–73.

5. Frolov E.B. MES-systems: operational functional and cost analysis for the needs of a manufacturing enterprise / *Vestnik MSUT «STANKIN»*, 2008, № 9, pp. 76–79.

6. Shutikov M.A. Introduction of a coordinate measuring machine after a responsible operation using the MES-system as a way to minimize the number of defective parts in the manufacture of products / M.A. Shutikov, A.N. Feofanov, T.G. Grishina // *International Research Journal*. – 2021. – № 9 (111).

7. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. The «digital twin» of the production system is a promising tool for increasing the efficiency of the machine park of a machine-building enterprise. *Stanochnyi park = Machine Park*. 2018. № 8. pp. 36–39.

УДК 62-50:004.057.8

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ СЧПУ СТАНКАМИ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМОЙ КИНЕМАТИКОЙ

С.В. Евстафиева
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Рассмотрены разработанные стенды для проведения испытаний, отличающиеся разным количеством координат и разным составом приводов, работающих по разным протоколам. Приведена программа и методика испытаний разработанных функций СЧПУ для управления станками с динамически изменяемой кинематикой.

Ключевые слова: СЧПУ, управляющая программа, станки с динамически изменяемой кинематикой, EtherCAT.

DEVELOPMENT OF A TEST PROCEDURE FOR CNC FOR THE MACHINE TOOLS WITH DYNAMICALLY VARIABLE KINEMATICS

S.V. Evstafieva
MSUT "STANKIN"

Abstract

The developed stands for testing, which differ in the number of coordinates and the different composition of the drives, operating according to different protocols, are considered. The program and methodology for testing the developed CNC functions for controlling machine tools with dynamically variable kinematics are given.

Keywords: CNC, part program, machine tools with dynamic kinematics, EtherCAT.

Введение

Станки с динамически изменяемой кинематикой подразумевают смену кинематической схемы «на лету», т.е. во время выполнения управляющей программы. При этом смена кинематической схемы может осуществляться из самой управляющей программы. Реализация этой возможности в системе управления подразумевает разработку соответствующих механизмов и поддерживающих их языковых функций. При смене кинематической схемы меняется количество и состав следящих приводов, состав и/или количество датчиков, других устройств электроавтоматики. Таким образом, необходимо дорабатывать набор базовых функций системы ЧПУ для управления таким оборудованием. Изменения необходимы для всех задач управления: геометрической – изменения кинематической схемы, алгоритмов интерполяции, состояний G-вектора системы; технологической – расположения заготовки, до-

ступный инструмент для обработки; логической – входы и выходы для устройств электроавтоматики, состав устройств электроавтоматики, алгоритмы управления этими устройствами; терминальной – отображение всех изменений в кинематической схеме, настройка и конфигурация устройств электроавтоматики и приводов; диагностической – диагностика приводов. Параметры для всех возможных используемых конфигураций должны быть предварительно сконфигурированы в машинных параметрах системы ЧПУ [1–3].

Описание функций, необходимых для станков с динамически изменяемой кинематикой

Для возможности смены кинематической схемы динамически, т.е. «на лету», необходимо иметь программную реализацию такой команды и вызывать ее непосредственно из управляющей программы.

При переключении кинематической схемы во время выполнения УП необходимо сохранять состояние G-вектора (совокупности всех текущих значений команд) и загружать сохраненное ранее состояние G-вектора для новой кинематики. Также параметры заготовки могут измениться. Необходимо задать положение заготовки для виртуального моделирования обработки и сообщить терминалу ЧПУ о начале обработки.

При смене кинематической схемы необходимо определить новое положение нуля управляющей программы. Переключение режима шпиндель/ось необходимо, когда в переключаемых кинематических схемах одна и та же ось может выполнять разные функции – быть либо шпинделем, либо интерполируемой осью. При этом все используемые кинематические схемы должны быть предварительно сконфигурированы в системе ЧПУ [4, 5].

Стенды, используемые для тестирования разработанных функций

Вертикально-фрезерный станок

Экспериментальный стенд (рис. 1) демонстрирует возможность управления системой ЧПУ «АксиОМА Контроль» трехкоординатным фрезерным станком при организации схемы подключения, приведенной на этом рисунке. Модуль реального времени подключен к терминальной части по протоколу TCP/IP, а к модулю ввода/вывода – по протоколу EtherCAT.



Рис. 1. Управление вертикально-фрезерным станком



Рис. 2. Настройка кинематической схемы для вертикально-фрезерного станка



Рис. 3. Настройка осей и приводов для вертикально-фрезерного станка

В качестве модуля ввода/вывода выступает баскаптер ODOT CN-8033, поддерживающий соединение по протоколу EtherCAT с максимальным количеством байт ввода/вывода, равным 1024.

Управление двигателями осей X и Z осуществляется с помощью приводов OMRON R88D-KN08H-ECT, двигателем оси Y – посредством привода ESTUN ED3L-15DEA. Ось вращения шпинделя с инструментом Шпиндель C является виртуальной.

Конфигурация базовой кинематической схемы (рис. 2) для вертикально-фрезерного станка: линейные перемещения по осям X, Y, Z и вращение шпинделя с инструментом C.

Настройка приводов и осей показана на рис. 3. Сконфигурированы оси станка – линейные и шпиндель, сконфигурированы приводы – выбран протокол работы EtherCAT, заданы режимы: позиционный – для линейных осей, отслеживания скорости – для шпинделя.

Вертикально-фрезерный станок с поворотным столом

Экспериментальный стенд (рис. 4) демонстрирует возможность управления системой ЧПУ «АксиОМА Контроль» трехкоординатным фрезерным станком с добавлением поворотного стола при организации схемы подключения, приведенной на этом рисунке. Модуль реального времени подключен к терминальной части по протоколу TCP/IP, а к модулю ввода/вывода – по протоколу EtherCAT.

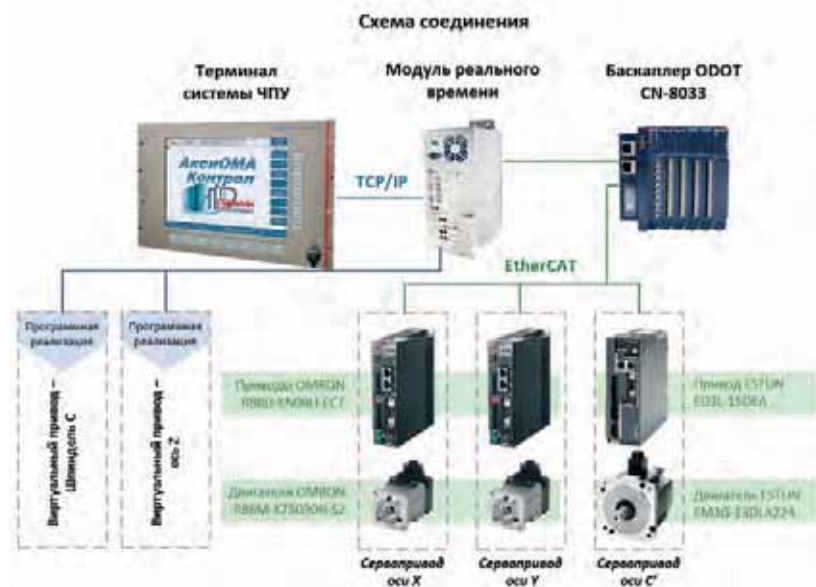


Рис. 4. Управление вертикально-фрезерным станком с поворотным столом

В качестве модуля ввода/вывода выступает бэкапpler ODOTCN-8033, поддерживающий соединение по протоколу EtherCAT с максимальным количеством байт ввода/вывода, равным 1024.

Управление двигателями осей X и Y осуществляется с помощью приводов OMRON R88D-KN08H-ECT, перемещениями по оси Z , вращением шпинделя с инструментом Шпиндель C управляют виртуальные приводы, а двигателем оси C' поворотного стола – привод ESTUN ED3L-15DEA.

Конфигурация базовой кинематической схемы для вертикально-фрезерного станка с поворотным столом: линейные перемещения по осям X , Y , Z , вращение шпинделя с инструментом C , поворот стола с заготовкой C' .

Настройка приводов и осей показана на рис. 5. Сконфигурированы оси станка – линейные, поворотные и шпиндель, сконфигурированы приводы – выбран протокол работы EtherCAT, заданы режимы: позиционный – для линейных и поворотных осей, отслеживания скорости – для шпинделя.

Оси	Параметры, относящиеся к осям
Параметры оси 1	Ииск X, канал 1 (ось канала 1), линейная
Параметры оси 2	Ииск Y, канал 1 (ось канала 2), линейная
Параметры оси 3	Ииск Z, канал 1 (ось канала 3), линейная
Параметры оси 4	Ииск C, канал 1 (ось канала 4), шпиндель
Параметры оси 5	Ииск C', канал 1 (ось канала 5), круговая

Приводы	Параметры, относящиеся к приводам
Параметры привода 1	EST, ось 1 (0), VelPuls, Описание: Сервопривод оси X
Параметры привода 2	EST, ось 2 (0), VelPuls, Описание: Сервопривод оси Y
Параметры привода 3	EST, ось 3 (2), VelPuls, Описание: Сервопривод оси Z
Параметры привода 4	VMT, ось 4 (C), VelPuls, Описание: Шпиндель
Параметры привода 5	VMT, ось 5 (C'), VelPuls, Описание: Поворотный стол

Рис. 5. Настройка осей и приводов для вертикально-фрезерного станка с поворотным столом

Программа и методика испытаний включают в себя тестирование функций, разработанных для осуществления динамического переключения кинематических схем, подключения приводов «на лету» с возможностью их верифицирования и отладки.

Команда `save_gvector` сохраняет текущее состояние G-вектора, команда `restore_gvector` загружает состояние G-вектора.

Формат записи:

`save_gvector` (параметр сохранения G-вектора).

Параметр сохранения G-вектора может принимать значения: модальные и немодальные G-функции без параметров; модальные G-функции без параметров, кроме функций смещения нуля и преобразований координат; модальные G-функции без параметров, кроме функций преобразований координат; модальные G-функции без параметров + параметры преобразований координат, кроме функций смещения нуля; модальные G-функции без параметров + параметры преобразований координат; все модальные функции с параметрами.

Формат записи для восстановления G-вектора: `restore_gvector` (переменная с состоянием G-вектора).

На рис. 6 показана УП с командами сохранения состояния G-вектора в переменную `sgv`, и последующее восстановление состояния G-вектора.

```
N1 G90 T1 M06 X-10 Y-10
M03 s1000
N2 G01 X0 Y0 F1000
N3 X0 Y100
sgv=save_gvector(1);
N4 G91 X100 Y100
N5 X100 Y0
restore_gvector(sgv);
N6 X0 Y0
N7 X-10 Y-10
```

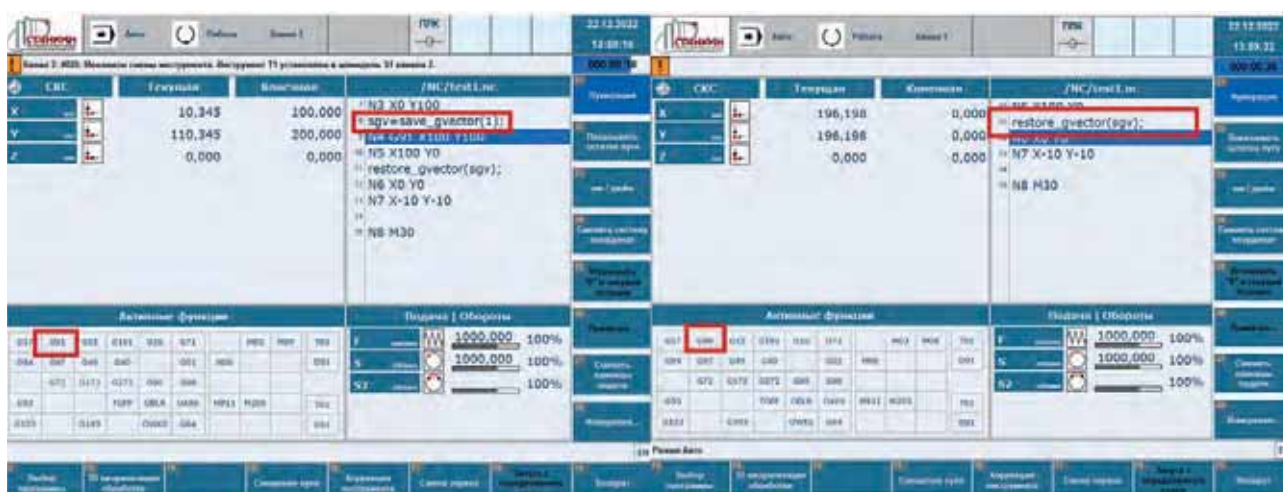


Рис. 6. Сохранение (слева) и восстановление (справа) G-вектора

После восстановления состояния G-вектора (`restore_gvector`) используется абсолютная система координат.

Определение нулевой точки заготовки

Формат команды:

`#workpiece` (параметр1, параметр2,...)

Пример использования команды:

`#workpiece` (0, 256, 1, 120, 120, 20, -60, -120, -20)

Здесь определена заготовка в виде параллелепипеда и включен фрезерный режим моделирования обработки. Размеры заготовки по осям X, Y, Z соответственно (120, 120, 20), ноль заготовки X, Y, Z (-60, -120, -20). Директива `#workpiece` обычно объявляется один раз в начале текста программы. В случае использования станков с динамически изменяемой кинематикой эта команда может быть использована всякий раз при смене кинематической схемы для моделирования процесса обработки.

Позиционирование заготовки

Команда `#workpiece_pos` используется для определения позиции и ориентации заготовки для виртуального моделирования обработки и сообщает терминалу ЧПУ о начале обработки. В отличие от директивы `#workpiece` вызов `#workpiece_pos` не приводит к созданию новой виртуальной заготовки, а лишь смещает уже установленную. Синтаксис:

`#workpiece_pos` (x, y, z, phi, theta, psi)

Пример:

`#workpiece_pos` (-60, -120, -20, 0, 15, 0)

Здесь заготовка смещена в позицию $\{-60, -120, -20\}$ мм и наклонена на угол $\theta = 15$ градусов. Директива `#workpiece_pos` обычно объявляется один раз в начале текста программы, хотя не запрещено ее использовать и далее.

Смещение нуля системы координат

Запись значения в таблицу смещения нуля программной системы координат выполняется при помощи команды `settable_zs`.

Формат записи команды:

`bool settable_zs` (int table_index, int page_number, string ax_name, double value)

где:

- `table_index` – индекс таблицы в диапазоне от 54 до 59, соответствующий G-функции;
- `page_number` – номер страницы P;
- `ax_name` – имя программируемой координаты для записи;
- `value` – значение для заданной координаты, мм или град.

Пример записи команды:

`settable_zs` (55, 1, "Y", 33.3)

Смещение нуля по оси Y в координату 33.3 показано на рис. 7. На рис. 7 вверху показана таблица смещений программного нуля до выполнения команды `settable_zs`, на рис. 7 внизу – после.

Система координат детали

Запись значения в таблицу задания системы координат детали выполняется командой `settable_wcs`.

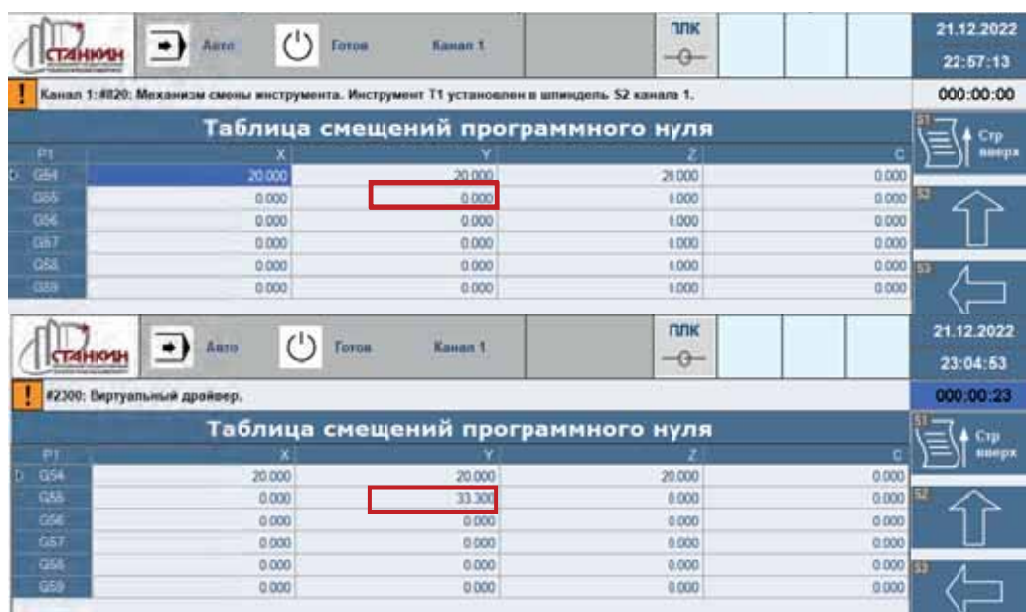


Рис. 7. Таблица смещений программного нуля до (вверху) и после (внизу) выполнения смещения

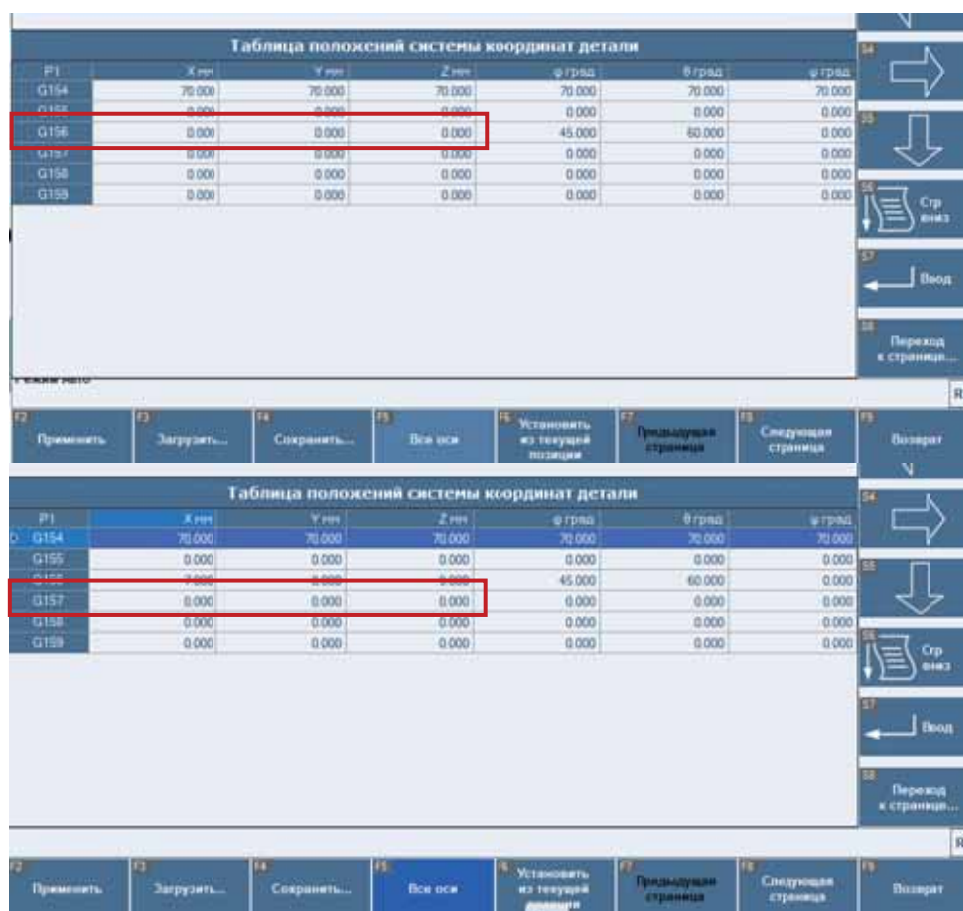


Рис. 8. Таблица положений системы координат детали без изменений и с записанными значениями

Формат записи команды:

bool settable_wcs (int table_index, int page_number, string ax_name, double value),

где:

table_index – индекс таблицы в диапазоне от 154 до 159, соответствующий G-функции;

page_number – номер страницы P;

ax_name – имя координаты для записи. Используются 6 возможных координат и углов ориентации: “X”, “Y”, “Z”, “Phi”, “Theta”, “Psi”;

value – значение для заданной координаты, мм или град.

Пример записи команды:

```
settable_wcs(156, 1, «X», 7);
settable_wcs(156, 1, «Y», 8);
settable_wcs(156, 1, «Z», 9).
```

На рис. 8 показана запись значений в таблицу положений системы координат детали. На рис. 8 вверху без изменений, на рис. 8 внизу с изменениями согласно примеру выше. Запись производится на 1 страницу.

Переключение режима шпindelь/ось

Для переключения в режим шпинделя используется команда M903, для переключения в режим интерполируемой оси используется команда M902.

Синтаксис: M902 N1 = <номер шпинделя>,

где <номер шпинделя> – номер шпинделя в канале.

Пример переключения шпинделя в режим оси:

M902N1 = 1

На рис. 9 слева показана работа оси в режиме шпинделя. В управляющей программе включается вращение шпинделя по часовой стрелке и задается



Рис. 9. Работа оси шпинделя в режиме «шпиндель»

Машинные параметры	
Описание	Машинные параметры "по умолчанию"
> Общие	Глобальные параметры
> Порты	Параметры, относящиеся к портам
> Аппаратура	Параметры аппаратуры системы ЧПУ и станка
> Каналы	Параметры, относящиеся к каналам
> Оси	Параметры, относящиеся к осям
> Приводы	Параметры, относящиеся к приводам
> Параметры привода 1	ECT, ось 1 (X), VelPos
> Параметры привода 2	ECT, ось 2 (Y), VelPos

Машинные параметры	
Описание	Машинные параметры "по умолчанию"
> Общие	Глобальные параметры
> Порты	Параметры, относящиеся к портам
> Аппаратура	Параметры аппаратуры системы ЧПУ и станка
> Каналы	Параметры, относящиеся к каналам
> Оси	Параметры, относящиеся к осям
> Приводы	Параметры, относящиеся к приводам
> Параметры привода 1	ECT, ось 1 (X), VelPos
> Параметры привода 2	ECT, ось 2 (Y), VelPos
> Параметры привода 3	ECT, ось 3 (Z), VelPos
> Параметры привода 4	VRT, ось 4 (C), VelSp

Рис. 10. Параметры приводов для первой (вверху) и второй (внизу) кинематических схем

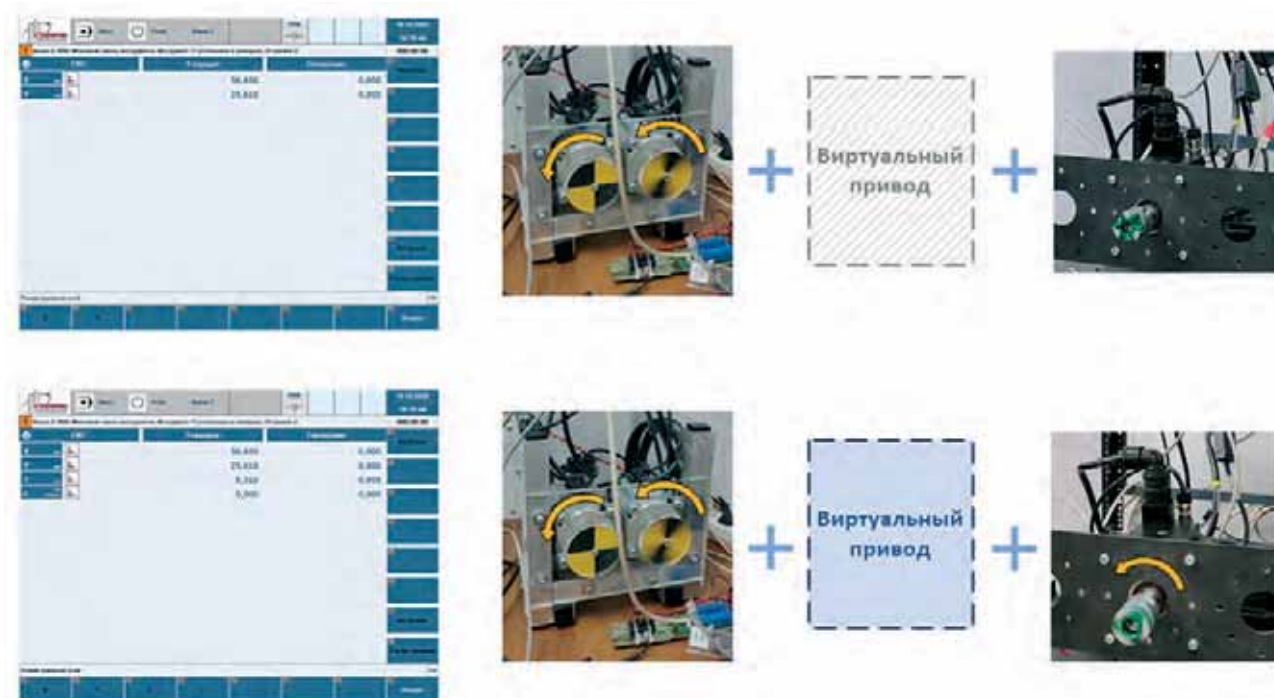


Рис. 11. Стенды с приводами для двух кинематических схем: Схема 1 с двумя приводами X и Y (вверху), Схема 2 с 3 приводами EtherCAT и одним виртуальным приводом (внизу)

частота вращения 1000 об/мин. Система ЧПУ обрабатывает указанные в УП задания. На *рис. 9* справа показана управляющая программа с переключением шпинделя в режим интерполируемой оси. При указанных значениях M03 и S1000 ось не является шпинделем, и указанная частота вращения не отрабатывается.

Переключение кинематической схемы

Переключение кинематической схемы выполняется командой #kinematics.

Формат команды:
#kinematics (kinematics_schema_id, channel_id)

где:

- kinematics_schema_id – номер кинематической схемы, к которой нужно переключиться;
- channel_id – номер канала для переключения.

Для возможности переключения кинематической схемы все схемы во всех каналах должны быть предварительно настроены, для осей и приводов заданы параметры (*рис. 10*).

На *рис. 11* вверху показан стенд для первой кинематической схемы с двумя приводами, X и Y, виртуальные приводы не используются. Приведен экран системы ЧПУ с активными координатами и стенды.

На *рис. 11* внизу показан стенд для второй кинематической схемы с четырьмя приводами: X, Y, Z – линейные оси, C – ось вращения шпинделя. Привод оси C будет виртуальным.

Все приводы работают по EtherCAT, однако с учетом того, что двигатели от разных производителей, имеется специфика в управлении.

Заключение

Для управления станками с динамически изменяемой кинематикой необходимо расширить набор стандартных функций системы управления. Расширения коснутся всех задач системы управления. Спроектированные и разработанные стенды позволяют протестировать работу функций системы ЧПУ на приводах, работающих по протоколу EtherCAT. Предварительно все приводы и оси, имитирующие станки с разными кинематиками, должны быть сконфигурированы. Для этого разработаны специальные экраны, описаны протоколы взаимодействия с этими приводами.

Разработаны методика испытаний, приведены примеры управляющих программ, показывающие работу соответствующих функций при изменении кинематической схемы, смене режима работы шпинделя/ось, сохранения/восстановления G-вектора, описания новой заготовки, расположения заготовки, смещения нуля системы координат. Все эти функции позволяют осуществлять смену кинематической схемы во время выполнения управляющей программы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект FSFS-2023-0004) и с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инженеринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

Библиографический список

1. Martinov G.M., Sokolov S.V., Pushkov R.L. et al. Control of the machine tools with variable kinematics. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 2331–2339 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07339-1>.

2. Любимов А.Б., Мартинов Г.М., Мартинова 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.

3. Мартинов 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.

4. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S., 2020. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. *ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences* 329, 03026. pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/202032903026.

5. G. Martinov, R. Pushkov and S. Evstafieva. Collecting Data from Variable Kinematic Machine Tools with OPC UA Protocol, 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 465–470, DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896291.

References

1. Martinov G.M., Sokolov S.V., Pushkov R.L. et al. Control of the machine tools with variable kinematics. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 2331–2339 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07339-1>.

2. Ljubimov A.B., Martinov G.M., Martinova L.I., Pushkov R.L. Building a digital control platform for process equipment with dynamically changing kinematics // *Automation in industry*, № 5. 2021. pp. 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.05.01.

3. Martinov G.M., Pushkov R.L., Sokolov S.V., Obukhov A.I., Evstafieva S.V. Numerical control of machine tools with dynamically changing kinematics // *Automation in industry*, № 5. 2020. pp. 12–17. DOI: 10.25728/avtprom.2020.05.02.

4. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S., 2020. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. *ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences* 329, 03026. pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/202032903026.

5. G. Martinov, R. Pushkov and S. Evstafieva. Collecting Data from Variable Kinematic Machine Tools with OPC UA Protocol, 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 465–470, DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896291.

Евстафиева Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

svetlana.evstafieva@gmail.com

Evstafieva Svetlana Vladimirovna – lecturer at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems”, MSUT “STANKIN”

svetlana.evstafieva@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The author have no conflicts of interest to declare.

УДК 658.51

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА СБОРКИ ИЗДЕЛИЯ С НЕСТАБИЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ОПЕРАЦИЙ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

В.А. Долгов, Н.В. Долгов, А.А. Акимов
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
О.С. Прошкина
ПАО «НПО «Алмаз»

Аннотация

В работе рассматриваются особенности расчета методами имитационного моделирования и математической статистики технологического цикла сборки изделия с нестабильной длительностью операций в многономенклатурном производстве. Производится расчет технологического цикла сборки редуктора с нестабильной длительностью операций.

Ключевые слова: технологический цикл сборки, системы имитационного моделирования, операции сборки, нестабильная длительность, мультимодальность.

FEATURES OF THE CALCULATION OF THE TECHNOLOGICAL CYCLE OF ASSEMBLY OF A PRODUCT WITH AN UNSTABLE DURATION OF OPERATIONS IN A MULTI-PRODUCT PRODUCTION USING SIMULATION MODELING AND MATHEMATICAL STATISTICS

V.A. Dolgov, N.V. Dolgov, A.A. Akimov
MSUT "STANKIN"
O.S. Proshkina
PJSC "NPO "Almaz"

Abstract

The paper discusses the features of calculation by simulation modeling and mathematical statistics of the technological cycle of assembling a product with an unstable duration of operations in a multi-product production. The calculation of the technological cycle of the gearbox assembly with an unstable duration of operations is carried out.

Keywords: technological cycle of assembly, simulation systems, assembly operations, unstable duration, multimodal.

В многономенклатурном производстве большое влияние на точность производственного планирования оказывает точность расчета технологического цикла сборки изделий.

Точность расчета технологического цикла сборки изделий зависит во многом от особенностей многономенклатурного производства. Среди них обычно выделяют следующие особенности: невысокая степень автоматизации и роботизации операций технологического процесса сборки изделия, большая номенклатура и короткий период технологической подготовки производства сборки изделия.

Стабильность длительности операций зависит от степени автоматизации рабочего места и от человеческого фактора. Кроме того, на стабильность операции влияет организация рабочего процесса и метод обеспечения точности сборки.

На сегодняшний день, при расчете технологического цикла сборки, получают широкое распространение сетевые методы, которые учитывают последовательно-параллельные схемы сборки комплекующих изделий [1], с помощью которых можно определить критический путь при сборке изделий.

На практике длительность операций непостоянна, и фактические значения могут изменяться в существенном диапазоне. При расчетах длительность операций сборки задается постоянными значениями [2]. Постоянные значения рассчитываются на основании норм длительностей операций.

Для получения более точного расчета необходимо учитывать нестабильные длительности операций сборки. В статье рассмотрены следующие методы расчета технологического цикла сборки изделия с нестабильной длительностью операций в многономенклатурном производстве:

- метод математической статистики;
- метод имитационного моделирования.

Метод математической статистики. Использование метода математической статистики создает множество вариантов для расчета длительности операций: минимальное и максимальное значения, среднеарифметическое, медиана, мода [3].

При использовании критического пути по минимальным, максимальным длительностям операций, возникает высокая погрешность, так как учитывает только одни границы диапазона для максимальных или минимальных длительностей операций.

При использовании среднего значения длительностей операций подразумевается, что длительности операций имеют нормальное распределение, что может не соответствовать действительности.

Использование мод длительностей операций позволяет точнее вычислить наиболее вероятную длительность критического пути. Однако, использование мод операций более обосновано при использовании имитационного моделирования, так как для одной операции может быть несколько мод, что усложняет расчеты.

Метод имитационного моделирования. При использовании имитационного моделирования можно задать длительность с помощью закона распределения случайной величины. При неизвестном законе распределения случайной величины наиболее предпочтительным вариантом является использование функций систем имитационного моделирования для расчета длительности в соответствии с статистической выборкой. Исходя из этого, главным требованием к системам имитационного моделирования является наличие возможности задания распределения случайной величины на основе статистической выборки.

Имитационное моделирование позволяет учесть мультимодальность операций и вычислить наиболее вероятный критический путь [4].

Некоторые операции имеют незначительные распределения длительности и для упрощения расчета их длительность задается константой. Другие операции имеют широкие диапазоны распределения длительности.

Для определения этих операций предлагается использовать коэффициент стабильности операции ($K_{ст}$) [5]. Выбор $K_{ст}$ основан на методе обеспечения точности. Значения коэффициента стабильности в зависимости от характеристики процесса сборки приведен в *табл. 1*.

Таблица 1

Значения коэффициента стабильности в зависимости от характеристики процесса сборки

Метод сборки	Характеристика стабильности цикла	Метод обеспечения точности	$K_{ст}$
пассивный	стабильный	полная взаимозаменяемость, групповая взаимозаменяемость	1
пассивный	нестабильный	неполная взаимозаменяемость	2
активный	нестабильный	регулировка, пригонка	3

При $K_{ст} = 2$ или $K_{ст} = 3$ для повышения точности расчета необходимо выполнить большое количество замеров длительности операций. При $K_{ст} = 1$ требуется единственный замер длительности операции.

С этой точки зрения длительность операций можно рассматривать как непрерывную случайную величину, определенную на заданном интервале.

В качестве примера расчета технологического цикла сборки рассмотрен процесс сборки редуктора.

В ходе анализа были выделены особенности рассматриваемого производства: большое количество номенклатуры, отсутствие плана выпуска, анализ технологического цикла выпуска изделий, мелкосерийный тип производства. Партия выпуска составляет 100 редукторов.

Рассматриваемый редуктор состоит из трех технологических узлов: муфты, вала 1 и вала 2. Для каждого узла представлен технологический процесс сборки в табл. 2–4. Технологический процесс сборки редуктора представлен в табл. 5.

Таблица 2

Технологический маршрут сборки муфты

№ операции	Название операции	Коэффициент стабильности $K_{ст}$
005	Комплектовочная	1
010	Слесарно-сборочная	3
015	Контрольная	1

Таблица 3

Технологический маршрут сборки Вал 1

№ операции	Название операции	Коэффициент стабильности $K_{ст}$
005	Комплектовочная	1
010	Слесарно-сборочная	3
015	Контрольная	1

Таблица 4

Технологический маршрут сборки Вал 2

№ операции	Название операции	Коэффициент стабильности $K_{ст}$
005	Комплектовочная	1
010	Слесарно-сборочная	3
015	Контрольная	1

Таблица 5

Технологический маршрут сборки редуктора

№ операции	Название операции	Коэффициент стабильности $K_{ст}$
005	Комплектовочная	1
010	Слесарно-сборочная	3
015	Испытательная	3
020	Контрольная	1



Рис. 1. Циклограмма процесса сборки редуктора

На рис. 1 представлена циклограмма процесса сборки редуктора. Процесс сборки головного изделия происходит после сборки всех узлов редуктора. Исходя из данных по длительности операций сборки на критическом пути могут оказаться узлы: вал 1 и вал 2. На «плавающий» критический путь влияют операции с нестабильной длительностью узлов. К операциям с переменной длительностью относятся операции технологических узлов (Муфта, Вал 1, Вал 2) – Слесарно-сборочная (010) и операции сборки головного изделия Слесарно-сборочная (010) и Испытательная (015), имеющие $K_{ст} = 3$.

Аналитически длительность критического пути будет рассчитываться по формуле:

$$T_{кр} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7, \quad (1)$$

где $T_{кр}$ – длительность критического пути сборки редуктора, ч,

T_1, T_2, T_3 – длительности операций сборки узла редуктора, лежащего на критическом пути, ч,

T_4, T_5, T_6, T_7 – длительности операций сборки редуктора, ч.

В табл. 6 представлены результаты расчета длительности сборки узлов редуктора и головного изделия.

Таблица 6

Расчет технологического цикла сборки технологических узлов редуктора статистическим методом

	Муфта	Вал 1	Вал 2	Редуктор
$T_{кр \min}, \text{ ч}$	1,6	2,6	2,9	7,8
$T_{кр \text{ ср}}, \text{ ч}$	1,92	2,89	3,17	8,53
$T_{кр \max}, \text{ ч}$	2,2	3,2	3,5	9,2
$T_{кр \text{ мод}1}, \text{ ч}$	2,12	2,72	2,92	8,46
$T_{кр \text{ мод}2}, \text{ ч}$		2,76	3,33	8,67
$T_{кр \text{ мод}3}, \text{ ч}$		3,08		

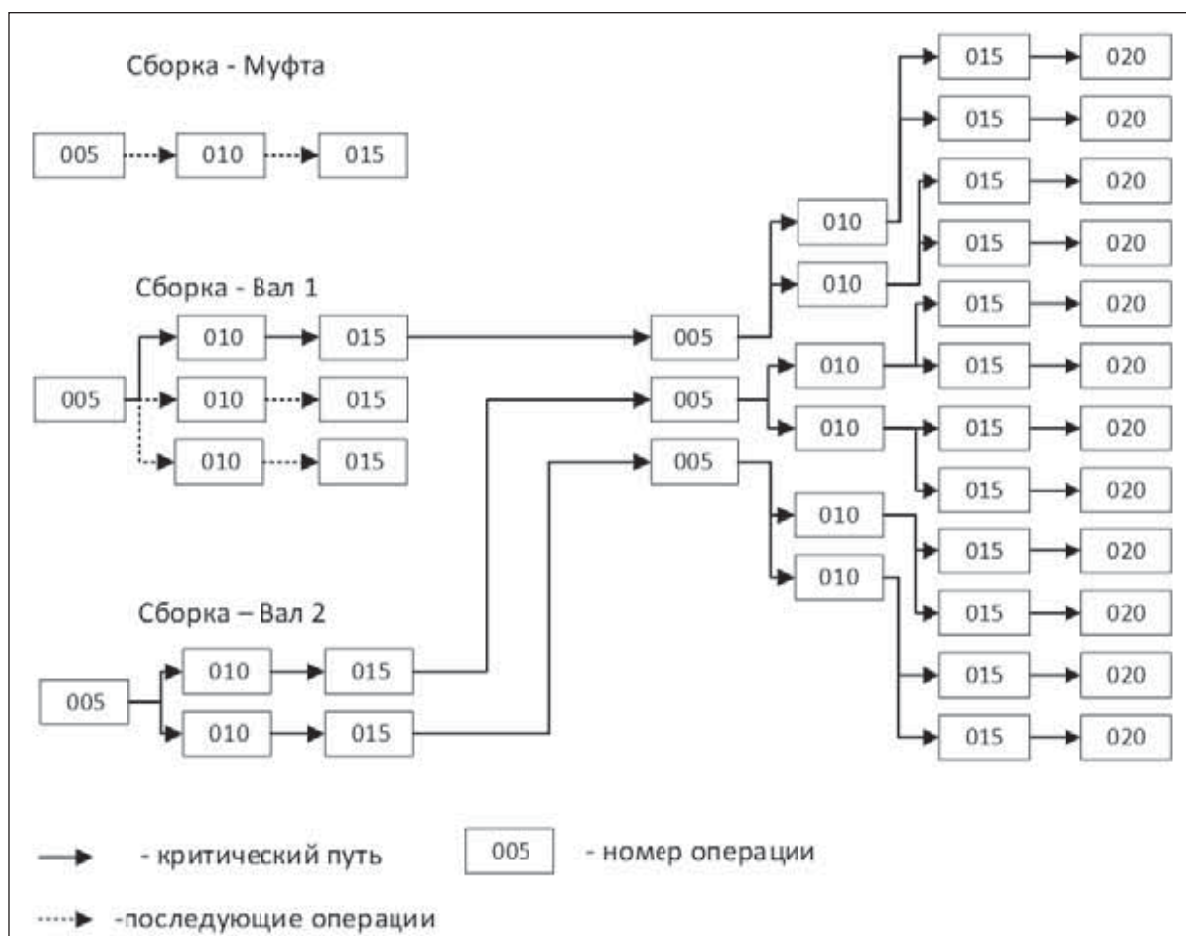


Рис. 2. Схема влияния мультимодальности на расчет длительности технологического цикла сборки редуктора

Как показывают результаты, у некоторых операций имеются несколько мод. Это осложняет расчет длительности сборки редуктора с использованием статистического метода по модам. На рис. 2 показаны возможные варианты расчета технологического цикла сборки редуктора по модам с учетом мультимодальности и «плавающего» критического пути.

В табл. 7 показаны результаты расчета длительности технологического цикла сборки редуктора статистическим методом: по минимальному, среднеарифметическому, максимальному значениям, а также по модам (расчет длительности сборки головного изделия происходил по максимальной моде).

Таблица 7

Расчет технологического цикла сборки редуктора статистическим методом

Длительность операции сборки узлов редуктора		Длительность операции сборки головного изделия		Длительность технологического цикла, ч
Характеристика	Длительность сборки, ч	Характеристика	Длительность сборки, ч	
$T_{кр\min}$ (Вал 2)	2,9	$T_{кр\min}$ (Редуктор)	7,8	10,7
$T_{кр\text{ ср}}$ (Вал 2)	3,17	$T_{кр\text{ ср}}$ (Редуктор)	8,53	11,7
$T_{кр\max}$ (Вал 2)	3,5	$T_{кр\max}$ (Редуктор)	9,2	12,7
$T_{кр\text{ мод1}}$ (Вал 2)	2,92	$T_{кр\text{ мод1}}$ (Редуктор)	8,46	11,38
$T_{кр\text{ мод3}}$ (Вал 1)	3,08	$T_{кр\text{ мод1}}$ (Редуктор)	8,46	11,54
$T_{кр\text{ мод2}}$ (Вал 2)	3,33	$T_{кр\text{ мод1}}$ (Редуктор)	8,46	11,79
$T_{кр\text{ мод1}}$ (Вал 2)	2,92	$T_{кр\text{ мод2}}$ (Редуктор)	8,67	11,59
$T_{кр\text{ мод3}}$ (Вал 1)	3,08	$T_{кр\text{ мод2}}$ (Редуктор)	8,67	11,75
$T_{кр\text{ мод2}}$ (Вал 2)	3,33	$T_{кр\text{ мод2}}$ (Редуктор)	8,67	12

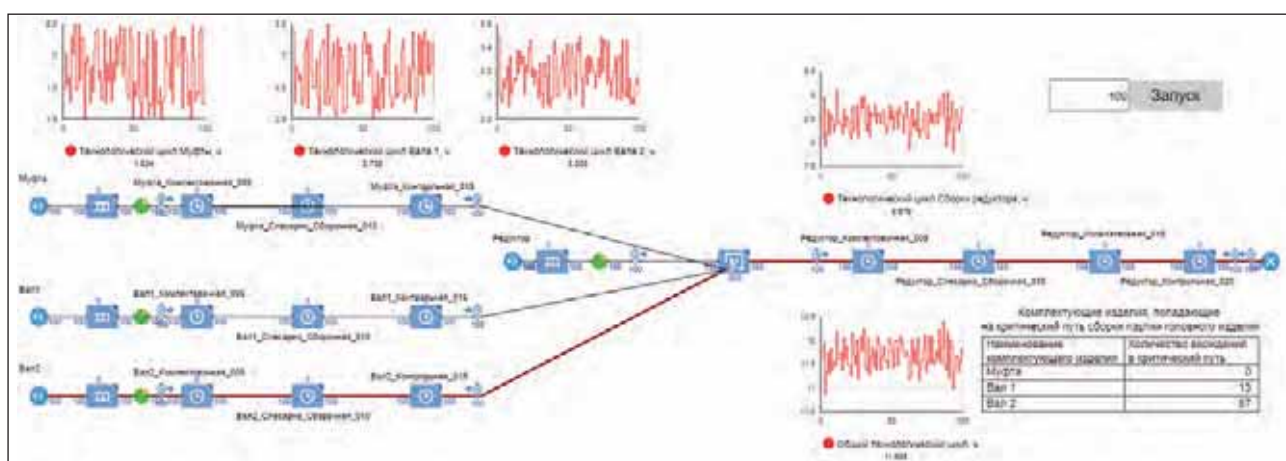


Рис. 3. Сетевая модель сборки редуктора с обозначением критического пути

Для расчета технологического цикла сборки редуктора имитационная модель разрабатывается в системе AnyLogic. Нестабильная длительность операций в модели задана распределением на основе имеющейся выборки, так как закон распределения случайной величины неизвестен, и данная система удовлетворяет требованию наличия функциональности для построения эмпирического распределения [7].

Рассмотрена процессная модель сборки редуктора, т.к. при имитационном моделировании нет необходимости оценки потребности в ресурсах и времени межоперационных интервалов [8].

На рис. 3 показана разработанная имитационная модель процесса сборки редуктора. В интерфейсе

модели отображен критический путь сборки последнего редуктора, а также таблица с количеством попадания на критический путь комплектующих изделий.

При прогоне имитационной модели одними из результирующих данных являются длительности операций сборки редуктора. На основании полученных данных определим моду длительности операций сборки. Определение моды позволит выбрать наиболее вероятную длительность операции сборки, и, следовательно, наиболее вероятную длительность технологического цикла [9].

В табл. 8 представлены результаты, полученные при прогоне имитационной модели.

В табл. 9 представлено сравнение методов расчета технологического цикла сборки.

Таблица 8

Результаты расчета технологического цикла сборки редуктора с использованием имитационного моделирования

Характеристика	Длительность, ч.
Минимальное значение	10,77
Среднеарифметическое значение	11,69
Максимальное значение	12,42
Мода	11,32
	11,89
	11,95

Таблица 9

Сравнение методов расчета технологического цикла сборки

Особенность	Метод математической статистики	Метод имитационного моделирования
Трудоёмкость расчета с учетом мультимодальности	высокая	низкая
Трудоёмкость расчета с учетом одномодальных значений	низкая	низкая
Периодичность применения модели	единичная	периодичная
Длительность подготовки к расчету	короткая	длительная

Статистический метод может использоваться для быстрого расчета с учетом одномодальных значений. В случае наличия мультимодальных значений длительности операций не рекомендуется использовать статистический метод.

Метод имитационного моделирования имеет больший срок подготовки к расчетам, однако является более гибким в случае длительного использования на предприятии неизменной или меняющейся незначительно информационной модели.

Метод имитационного моделирования более предпочтителен, т.к. позволяет сократить трудоемкость расчета при учете мультимодальности.

Библиографический список

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Т. III-5 / А.А. Гусев, В.В. Павлов; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 2001. – 640 с.

2. Вартанов М.В., Чан Чунг Та. Сборочное производство: проблемы и решения // Станкоинструмент. 2020, № 2 (019). С. 22–29.

3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1997. – 479 с.

4. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Леонов А.А. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест. // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 1. С. 3–10. DOI:10.36652/0869-4931-2021-75-1-3-10.

5. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Умнов П.И., Фокин Н.Н., Прошкина О.С. Оценка станкоемкости изготовления изделий гражданской продукции на машиностроительных предприятиях ОПК // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 7. DOI: 10.36652/0869-4931-75-2021-75-7-291-295.

6. S.N. Grigoriev, V.A. Dolgov, P.A. Nikishechkin, and N. V. Dolgov. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971, pp. 032094, Materials Science (2020). DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032094.

7. AnyLogic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/>

8. Прошкина О.С., Акимов А.А. Задание влияния нестабильной длительности операций сборки в системах имитационного моделирования // Наука в современном мире: результаты исследований и открытий: сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции, Анапа, 08 августа 2022 года. 2022. – С. 18–25. – EDN RGEUWB.

9. Прошкина, О.С., Долгов Н.В. Расчет технологического цикла сборки редуктора с нестабильной длительностью операций на основе использования имитационного моделирования // Наука и технологии: модернизация, инновации, прогресс: Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции, Анапа, 27 августа 2022 года. 2022. – С. 54–60. – EDN FFONIX.

References

1. Mechanical engineering. Encyclopedia / Ed. advice: K.V. Frolov (prev.) and others – M.: Mashinostroenie. Assembly technology in mechanical engineering. T. III-5 / A.A. Gusev, V.V. Pavlov; ed. Yu.M. Solomentsev. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 640 p.

2. M.V. Vartanov, Chan Chung Ta. Assembly production: problems and solutions // Stankoinstrument. 2020, № 2 (019). pp. 22–29.

3. Gmurman V.E. Theory of Probability and Mathematical Statistics. – M.: Higher. school, 1997. – 479 p.

4. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Leonov A.A. Simulation modeling of production processes using the logics of planned and situational reservation of jobs. // Automation. Modern technologies. 2021. № 1. S.3–10. DOI:10.36652/0869-4931-2021-75-1-3-10.

5. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Umnov P.I., Fokin N.N., Proshkina O.S. Evaluation of the machine-tool capacity of manufacturing civilian products at machine-building enterprises of the defense industrial complex // Automation. Modern technologies. 2021. №. 7. DOI: 10.36652/0869-4931-75-2021-75-7-291-295.

6. S.N. Grigoriev, V.A. Dolgov, P.A. Nikishechkin, and N. V. Dolgov. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971, pp. 032094, Materials Science (2020). DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032094.

7. AnyLogic [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.anylogic.ru/>

8. Proshkina O.S., Akimov A.A. Setting the influence of the unstable duration of assembly operations in simulation systems // Science in the modern world: results of research and discoveries: a collection of scientific papers based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Anapa, August 08, 2022. 2022. – S. 18–25. – EDN RGEUWB.

9. Proshkina, O.S., Dolgov N.V. Calculation of the technological cycle of assembly of a gearbox with an unstable duration of operations based on the use of simulation // Science and technology: modernization, innovation, progress: Collection of scientific papers based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Anapa, August 27, 2022. 2022. – S. 54–60. – EDN FFONIX.

Долгов Виталий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

v-dolgov@yandex.ru

Прошкина Ольга Сергеевна – ведущий инженер-технолог, ПАО «НПО «Алмаз»

oproshkina123@gmail.com

Долгов Никита Витальевич – аспирант кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

dnv@digitalfabrika.ru

Акимов Артём Александрович – аспирант кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

akimov2804@gmail.com

Dolgov Vitaliy Anatolievich – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”

v-dolgov@yandex.ru

Proshkina Olga Sergeevna – leading process engineer, PJSC “NPO “Almaz”

oproshkina123@gmail.com

Dolgov Nikita Vitalievich – postgraduate student at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”

dnv@digitalfabrika.ru

Akimov Artyom Aleksandrovich – postgraduate student at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”

akimov2804@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.941: 64.011.56

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА И СИЛ РЕЗАНИЯ

Ю.А. Темпель, Д.Е. Васьков, О.А. Темпель
Тюменский индустриальный университет

Аннотация

В связи с быстро меняющимися требованиями к точности детали и процессу металлообработки, важной задачей в автоматизации технической подготовки производства и технологии машиностроения является обеспечение заявляемых требований конструкторской и технологической документации к изделиям в кратчайшие сроки, обеспечивающие конкурентоспособность предприятий машиностроения. Поэтому исследование и анализ факторов, влияющих на обработку заготовок, является актуальной задачей при обеспечении требований к качеству поверхности деталей. В работе представлены результаты моделирования и анализа влияния температуры и сил резания на геометрию детали в программе ANSYS, и их учет при формировании управляющей программы для станка с ЧПУ.

Ключевые слова: автоматизация, технологическая подготовка производства, управляющая программа, станок с ЧПУ, качество металлообработки, САД-модель.

METHOD OF AUTOMATED CORRECTION OF CONTROL PROGRAMS FOR CNC MACHINES, TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE FACTOR AND CUTTING FORCES

Yu.A. Tempel, D.E. Vaskov, O.A. Tempel
Tyumen Industrial University

Abstract

Due to the rapidly changing requirements for the accuracy of the part and the metalworking process, an important task in automating the technical preparation of production and engineering technology is to provide the stated requirements with design and technological documentation in the shortest possible time, ensuring the competitiveness of engineering enterprises. Therefore, the study and analysis of the influence of factors affecting the processing of workpieces is an urgent task in ensuring the requirements for the quality of the surface of parts. The paper presents the results of modeling and analysis of the influence of temperature and cutting forces on the geometry of the part in the ANSYS program, and their consideration when generating a control program for a CNC machine.

Keywords: automation, technological preparation of production, control program, CNC machine, metalworking quality, CAD model.

Введение

Цифровые технологии в управлении технологическими процессами и производствами и автоматизация работ позволяют более эффективно использовать цепочку взаимодействия CAD/CAE/CAM-систем. В связи с ростом маложестких и нежестких деталей применение имеющихся средств позволяет более результативно обеспечить точность их производства. В работе [1] представлена авторская методика, которая предусматривает учет сил резания, но расширив граничные условия математической модели можно включить и учет погрешности, возникающей от температурного фактора с применением инженерных расчетов, что и представлено в данной статье.

Многие работы исследователей [2–7] направлены на решение проблем, возникающих при рассмотрении данных вопросов автоматизации с целью повышения качества производства. Основными направлениями развития являются модернизация оборудования, приспособлений и разработка нового программного обеспечения и систем, методов и методик автоматизации.

Материал и методы исследования

В исследовании для реализации поставленной цели применялись методы анализа, синтеза, обобщения. Экспериментальные исследования проводились с использованием CAD/CAE-системы ANSYS и методов компьютерного моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Среди факторов, которые определяют процесс токарной обработки, выделяют влияние сил резания и температурный фактор, как погрешности формообразования детали [8–11]. Законы теплообразования

объясняют ряд явлений, связанных с нагрузкой резца, его стойкостью, качеством обработанной поверхности.

Развитие компьютерных технологий позволяет реализовать модельные эксперименты, чтоб сократить материальные и иные ресурсы на проведение натурных опытов и выявить количественную величину погрешности, вызванную теплотой и силами резания.

В связи с выше сказанным, целью исследования является разработка методики автоматизированного ввода коррекции в управляющую программу на станок с ЧПУ с учетом моделирования и анализа влияния температурного фактора и сил резания на геометрические параметры тонкостенной детали при токарной обработке.

Объект исследования: тонкостенная деталь типа корпуса-муфты, используемая в конструкции погружного насоса для нефтегазовой отрасли.

Предмет исследования: геометрия детали и ее изменение при исследованиях влияния температурного фактора и сил резания.

В работе [1] представлена авторская методика по автоматизированному вводу коррекции в управляющую программу на станок с ЧПУ по результатам исследования погрешности, возникающей от воздействия сил резания. Методика основана на математическом и компьютерном моделировании, результатом действий при реализации которой является трансформированная CAD-модель детали и скорректированная на основе этих данных управляющая программа. Для расширения возможности предлагаемой методики, рассматривается возможность учета и температурного фактора, если задаться граничным условием – оптимальной температурой в зоне резания, по результатам исследований других авторов [12–14]. В связи с этим, ниже представлены результаты исследования температурного фактора на формообразование поверхности детали.

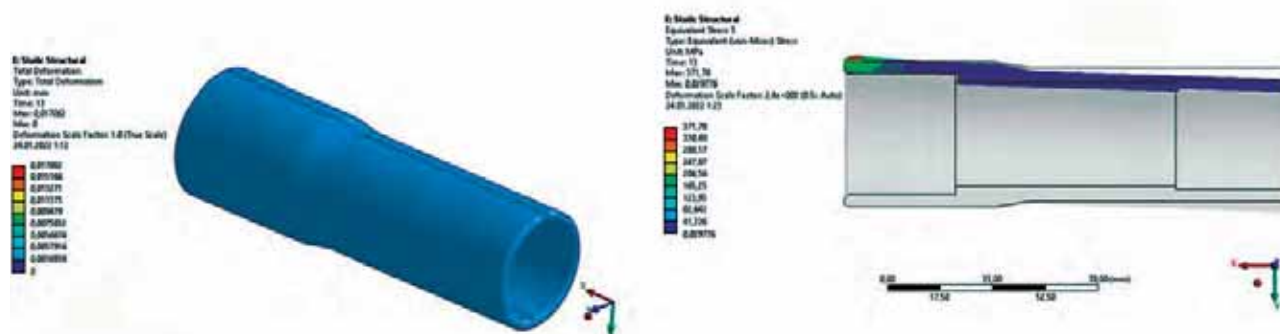


Рис. 1. Процесс моделирования оптимальной температуры в зоне резания при обработке корпуса-муфты путем применения CAD/CAE/CAM-систем ANSYS

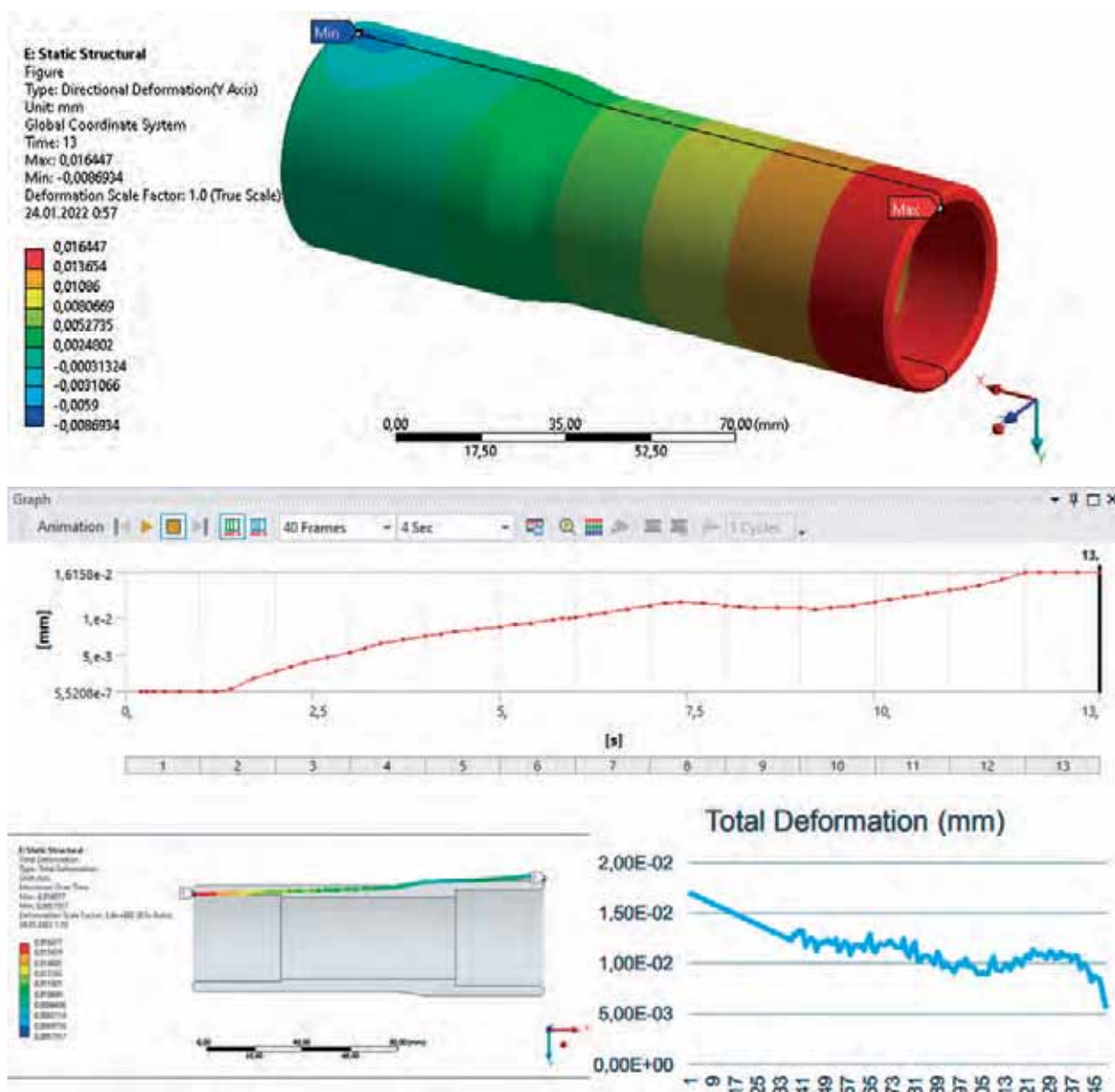


Рис. 2. Распределение величин отклонений от номинального диаметра по длине детали в 13 сечениях

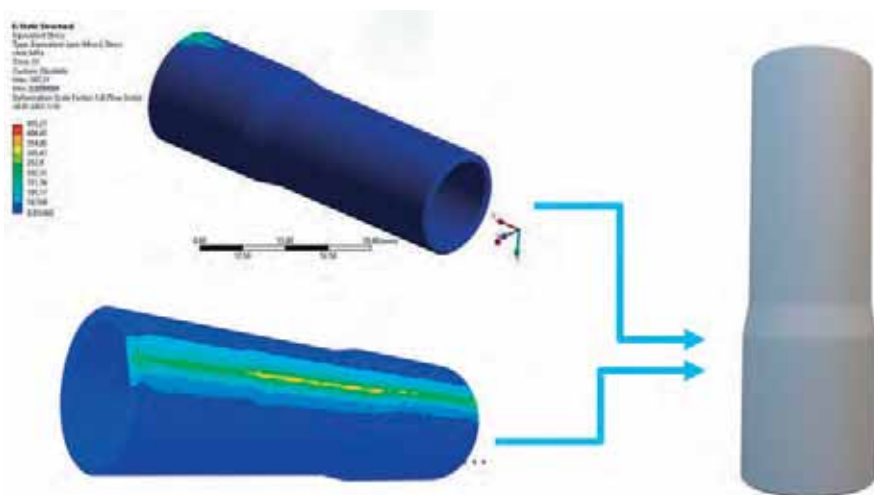


Рис. 3. 3D-модель исследуемой детали после проведения инженерных расчетов влияния температурного фактора

В программе ANSYS был смоделирован процесс влияния оптимальной температуры в зоне резания при обработке корпуса-муфты (рис. 1), геометрические параметры которого следующие: максимальный диаметр 44 мм при длине обработки 147 мм, толщина стенки детали 3 мм.

Исследование и анализ влияния температурного фактора на величину отклонения проводились при условии токарной обработки и оптимальной температуры резания с закреплением заготовки консолю в токарном патроне, материал заготовки – сталь 45. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

По результатам моделирования получены величины отклонений от номинального диаметра по длине детали в 13 сечениях при оптимальной температуре резания, которые можно учесть до металлообработки, получив зависимости в рамках дальнейшего исследования методики автоматизированной коррекции управляющей программы по результатам работы [1].

Полученная 3D-модель детали после проведения расчетов представлена на рис. 3.

Выводы

Используя методику автора и математическую модель [1], можно учесть выявленные зависимости и величины отклонений для расчетов погрешности и трансформации САД-модели детали и автоматизированной коррекции управляющей программы.

Установлено, что для определения конкретных величин пространственных отклонений профиля детали от номинальных значений, возникающих в процессе металлообработки от температурного фактора, можно использовать численные исследования с использованием метода конечных элементов и смоделировать САД-модель с учетом этих величин в САПР.

Библиографический список

1. Темпель Ю.А. Автоматизированная коррекция управляющих программ для станков с ЧПУ по трансформируемой САД-модели маложесткой заготовки в рамках технической подготовки производства / Р.Ю. Некрасов, Ю.А. Темпель // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2021. – № 1 (56). – С. 33–38.
2. Жданов А.А., Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Фирсов И.В. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ // Научные труды Sworld. 2015. № 4 (41). С. 41–47.
3. Лысенко А.Ф. К оценке погрешности обработки деталей при интеллектуальном управлении станком // Вестник донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону). 2014. Т. 14. № 3 (78). С. 96–102.
4. Кузнецов А.С. Технологическое обеспечение точности при обработке на станках с ЧПУ // Современные проблемы науки и образования (Пенза). 2015. № 2. С. 165–170.
5. Козинский В.С. Применение метода конечных элементов и тонкостенных трехслойных деталей из ПКМ в машиностроении // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: материалы VII Междунар. науч.–практ. конф. 2016. № 1 (7). С. 200–202.
6. Тугенгольд А.К., Лукьянов Е.А., Герасимов В.А. Система управления станком, обеспечивающая повышенную точность обработки // СТИН. 1999. № 8. С. 21–26.
7. Технологическое обеспечение точности и математическое моделирование процессов механообработки в машиностроении: учеб. пос. / В.И. Иванов, В.В. Новоселов, Ю.И. Некрасов; под ред. Ю.И. Шаходанова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. – 194 с.
8. Некрасов Р.Ю., Коленчин Н.Ф., Путилова У.С. Технологическое обеспечение размерной точности обработки в производстве нефтегазового оборудования // Информационные технологии в образовательном процессе. Матер. обл. науч.-метод. конф. 2002. С. 194–196.
9. Темпель Ю.А., Темпель О.А. К вопросу о технологических возможностях и особенностях обработки заготовок на станках с ЧПУ // Международная научно-практическая конференция молодых исследователей им. Д.И. Менделеева: материалы конференции. 2016. С. 482–486.
10. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов: Монография / А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та., 2012. – 188 с.
11. Артамонов Е.В. Резание металлов и температурный фактор: учебное пособие / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев // Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – с. 150.
12. Зантур Сахби, Богуславский В.А., Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://masters.donntu.org/2011/fimm/okulik/library/article2.pdf>.
13. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://stanok-online.ru/literatura/rezka-metallov/6214-optimizaciya-processov-rezaniya.html>

References

1. R.Y. Nekrasov, Y.A. Tempel. Automated correction of control programs for CNC machines according to a transformable CAD model of a low-rigid workpiece as part of the technical preparation of production / Vestnik MSUT «STANKIN», 33–38, (2021), № 1 (56).
2. A.A. Zhdanov, A.L. Lotnikov, Yu.L. Chigirinsky, I.V. Firsov. Scientific works of Sworld, Mathematical model for refining cutting conditions to ensure the accuracy of turning non-rigid shafts on CNC machines, 41–47, (2015), № 4 (41).
3. A.F. Lysenko, Bulletin of the Don State Technical University (Rostov-on-Don), On the assessment of the error in processing parts with intelligent control of the machine, 96–102, (2014), № 3 (78).
4. A.S. Kuznetsov. Modern problems of science and education (Penza), Technological support of accuracy when processing on CNC machines, 165–170, (2015), № 2.
5. V.S. Kozinsky. Actual directions of scientific research: from theory to practice: materials of the VII Intern. Scientific-pract. Conf, Application of the finite element method and thin-walled three-layer PCM parts in mechanical engineering, 200–202, (2016), № 1 (7).
6. A.K. Tugengold, E.A. Lukyanov, V.A. Gerasimov, STIN, Machine control system for improved machining accuracy, 21–26, (1999), № 8.
7. Technological support of accuracy and mathematical modeling of machining processes in mechanical engineering: textbook. / IN AND. Ivanov, V.V. Novoselov, Yu.I. Nekrasov; ed. Yu.I. Shakhodanov. – Tyumen: TSOGU, 2001. – 194 p.
8. R.Yu. Nekrasov, N.F. Kolenchin, U.S. Putilova Technological support of dimensional accuracy of processing in the production of oil and gas equipment // Information technologies in the educational process. Mater. region scientific method. conf. 2002. P. 194–196.
9. Yu.A. Tempel, O.A. Tempel, On the issue of technological capabilities and features of processing workpieces on CNC machines // International Scientific and Practical Conference of Young Researchers. D.I. Mendeleev: materials of the conference. 2016. P. 482–486.
10. Scientific basis for ensuring surface roughness based on the analysis of random processes: Monograph / A.K. Ostapchuk, V.E. Ovsyannikov. – Kurgan: Publishing House of the Kurgan State University. 2012. – 188 p.
11. E.V. Artamonov Metal cutting and temperature factor: textbook / E.V. Artamonov, D.V. Vasiliev, M.Kh. Uteshev // Tyumen: TSOGU, 2012. – p. 150.
12. Zantur Sahbi, Boguslavsky V.A., Ivchenko T.G. Optimization of cutting conditions when turning hard-to-cut materials, taking into account temperature restrictions [Electronic resource] – <http://masters.donntu.org/2011/fimm/okulik/library/article2.pdf>
13. Makarov A.D. Optimization of cutting processes [Electronic resource] – <http://stanok-online.ru/literatura/rezka-metallov/6214-optimizaciya-processov-rezaniya.html>

Темпель Юлия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

Tempelja@tyuiu.ru

Васьков Данил Евгеньевич – обучающийся кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

vaskovde@tyuiu.ru

Темпель Ольга Александровна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

tempel_o@mail.ru

Tempel Yulia Aleksandrovna – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

Tempelja@tyuiu.ru

Vaskov Danil Evgenievich – student at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

vaskovde@tyuiu.ru

Tempel Olga Alexandrovna – senior lecturer at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

tempel_o@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 378.02:621; 658.512.2 (075.8)

ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕСУРСОВ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА SOLVING MILL 2.0.

А.Г. Карлов

Севастопольский государственный университет

Аннотация

Описан опыт индивидуальной и коллективной работы с софтом Solving Mill 2.0. в Лаборатории ТРИЗ Севастопольского государственного университета (СевГУ) при решении проблем совершенствования таких накопителей механической энергии как маховики, супермаховики и системы автоматизации управления процессами, которые обеспечивают повышение функциональности и эффективности применения таких устройств. Представлен обзор некоторых инновационных решений накопителей механической энергии и эволюция подобных систем в ряде перспективных направлений применения такой техники и соответствующих технологий её использования.

Ключевые слова: междисциплинарные проблемы, теория решения изобретательских задач, общая теория сильного мышления, алгоритм исправления проблемных ситуаций, темплейт.

INVENTIVE SOLUTIONS IN THE PROCESS OF EVOLUTION OF AUTOMATED KINETIC ENERGY STORAGE SYSTEMS BASED ON THE USE OF RESOURCES OF THE SOLVING MILL 2.0. SOFTWARE PRODUCT

A.G. Karlov

Sevastopol state university

Abstract

The experience of individual and collective work with Solving Mill 2.0. software is described in the TRIZ Laboratory of Sevastopol State University (SevSU) in solving problems of improving such mechanical energy storage devices as flywheels, superflywheels and process control automation systems, which provide an increase in the functionality and efficiency of the use of such devices. An overview of some innovative solutions of mechanical energy storage devices and the evolution of such systems in a number of promising areas of application of such equipment and appropriate technologies for its use is presented.

Keywords: interdisciplinary problems, theory of inventive problem solving, general theory of strong thinking, algorithm for correcting problem situations, template.

Введение

Проблемы повышения результативности работы над инновационными проектами автоматизации аппаратных средств и систем могут быть более эффективно решены, если кроме личного опыта поиска концептуальных решений авторы применяют и современные программные продукты поддержки изобретательского процесса. В нескольких публикациях [1–9] мы уже знакомили читателей с возможностями и примерами успешного применения программного продукта поддержки изобретательского творчества Solving Mill 2.0. В предлагаемом ниже материале мы хотим остановиться на теме применения инструментов ОТСМ-ТРИЗ и упомянутого выше софта в сфере эволюции и автоматизации таких накопителей механической энергии как маховики.

В качестве накопителей энергии маховики применяют уже несколько столетий, однако качественный скачок в области их энергоёмкости произошел только в 1960-е годы, когда были созданы первые супермаховики.

Проблемы создания и совершенствования устройств и систем автоматизации процессов накопления кинетической энергии, её преобразования в иные виды энергии, достаточно часто становятся объектом исследований и решений соискателей учёной степени по таким научным специальностям как 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» и близких к ним. Поиск новых направлений развития и автоматизации таких технических систем как накопители кинетической энергии могут быть более успешными, если внимательно изучать и применять на практике творческое наследие создателя ТРИЗ и его последователей.

Известно, что автор ТРИЗ – Г.С. Альтшуллер – в конце 40-х – начале 50-х годов XX века проанализировал огромную базу данных патентов, имея целью понять те принципы, которыми руководствовались изобретатели при получении новых идей, и выделить смысл действий изобретателя при переходе от одного варианта технического устройства к другому. В результате стало понятно, что изобретатели применяют для улучшения совершенно разных устройств общие способы преобразований.

Анализ патентных баз данных дал ещё один важный результат: помог выявить направления развития, единые для самых разных классов техники. На этой основе автор ТРИЗ сформулировал

законы развития технических систем и другие важные компоненты теории решения изобретательских задач.

В приведенном ниже материале авторы хотели сопоставить ресурсы и возможности инструментов ОТСМ-ТРИЗ, программного продукта Solving Mill 2.0., некоторые результаты его практического применения при решении проблем совершенствования такого объекта как маховик, и известные факты из истории этой области техники. Рассмотрены и перспективные проекты различных авторов-изобретателей инновационных накопителей и преобразователей механической энергии.

Решение проблем совершенствования конструкции и автоматизация управления накопителями энергии типа «Маховик» с применением ресурсов программного продукта Solving Mill 2.0.

Интеллектуальные системы построены на основе выявленных в ТРИЗ объективных законов развития технических систем [1, 10]. Именно следование законам развития дает возможность сделать конкурентоспособными выпускаемые продукты и разрабатываемые технологии. Это позволяет избежать многих дорогостоящих ошибок проектирования и повысить качественный уровень идей, определяющих главные показатели новой техники.

С одним из достаточно известных в ТРИЗ-сообществе экспертов, мастером ТРИЗ Николаем Андреевичем Шпаковским, автору настоящей статьи выпала честь творчески сотрудничать несколько лет и опубликовать несколько работ в сфере применения оригинального программного продукта Solving Mill 2.0. при создании инновационных технологий и технических систем автоматизации производства [1, 2, 8].

Рассмотрим еще один из примеров применения указанного софта при поиске концептуальных решений такой актуальной проблемы как совершенствование конструкции и автоматизация управления накопителями энергии типа маховик.

Ниже представлены фрагменты из отчёта о диалоге с софтом «Solving-Mill.com version SM-2.0.» с иллюстрациями, которые были включены в этот документ авторами.

Примеры для обучения в составе софта Solving Mill – сквозные кейс-стади по решённым задачам. Супермаховик для аккумуляции механической энергии

Опишите проблемную ситуацию в свободной форме

Супермаховик применяется для аккумуляции механической энергии, и является на сегодняшний день наиболее эффективным. Маховик устанавливается в вакуумированном корпусе на магнитных подвесах. Вращение на маховик и от маховика передается при помощи электромагнитной муфты. Раскрученный до сотен тысяч оборотов в минуту маховик может вращаться несколько лет, сохраняя аккумулированную энергию.

Проблема заключается в том, что при высокой скорости вращения возникает большая центробежная сила, которая стремится разорвать маховик.

Конечно, маховик делают из очень прочных материалов, но вероятность его разрыва достаточно велика.

Как повысить безопасность маховичного аккумулятора механической энергии?

Вы можете сформулировать условие задачи?

Да.

Нет (требуется анализ).

Определение обстоятельств проблемной ситуации

Укажите полезный продукт

Целый вращающийся маховик.

Опишите процесс производства полезного продукта

Маховик вращается под действием сил инерции.

Укажите нежелательный эффект

Разрушение колеса маховика.

Определите машину, производящую полезный продукт.

Машина

Маховик (рис. 1).

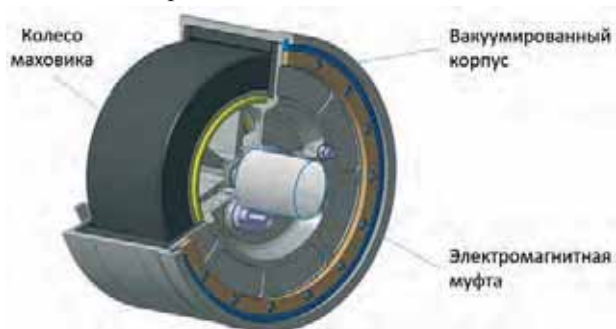


Рис. 1. Устройство маховика

Процесс

Сохраняет энергию.

Вредный продукт

Разрушенный маховик.

Полезный продукт

Целый вращающийся маховик.

Сформулируйте главную полезную функцию машины «Маховик»

Сохранять механическую энергию.

Опишите состав и устройство машины «Маховик»

Компоненты машины

Колесо, вакуумированный корпус, магнитные подшипники, электромагнитная муфта.

Устройство машины

Колесо находится внутри вакуумированного корпуса, колесо установлено на магнитных подшипниках, электромагнитная муфта для передачи энергии установлена с одной стороны корпуса. Одна полумуфта находится внутри вакуумированного корпуса, вторая снаружи. Вращение передается за счет электромагнитного взаимодействия полумуфт.

Опишите, как машина «Маховик» работает (рис. 2)

Маховик раскручивается внутри вакуумированного корпуса от внешнего источника механической энергии вращения. Маховик вращается внутри корпуса долгое время, сохраняя энергию вращения. Вращение на маховик и от маховика передается при помощи электромагнитной муфты.

При отборе энергии вращения электромагнитная муфта включается и связывает вращающееся колесо маховика с внешним потребителем энергии вращения. При этом механического контакта между колесом и внешним потребителем нет.

Определите проблемную операцию

Схема проблемной операции

Исполнитель

Колесо маховика.

Операция

Сохраняет энергию вращения.

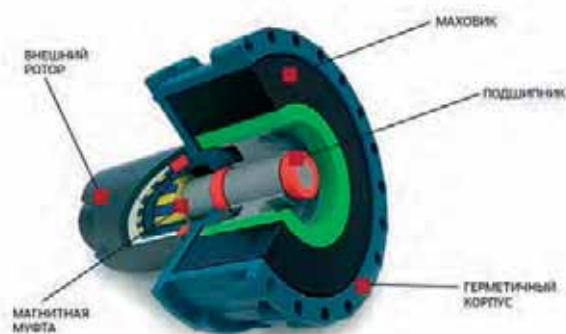


Рис. 2. Компоненты и функции элементов маховика



Рис. 3. Модель вредной системы

Вредный продукт

Разорванное колесо маховика (рис. 3).

Полезный продукт

Целое колесо маховика.

Опишите, как выполняется проблемная операция

Опишите конфликт

Место конфликта

Наружная часть колеса маховика (оперативная зона – ОЗ).

Время конфликта

Время, когда маховик раскручен и сохраняет энергию вращения (оперативное время – ОВ).

Причины конфликта

Определите причины конфликта

Недостаточная прочность материала маховика. Возникновение трещин по окружности колеса маховика.

Большие внутренние напряжения в материале колеса.

Разрушение материала колеса по периферии окружности.

Сформулируйте гипотезы устранения конфликта (рис. 4)

После формулирования гипотез продолжите решение, выбрав справа гипотезу для построения модели задачи на её основе.



Рис. 4. Причины конфликта по результатам причинно-следственного анализа

Причины конфликта

Недостаточная прочность материала маховика.
Возникновение трещин по окружности колеса маховика.

Большие внутренние напряжения в материале колеса.

Разрушение материала колеса по периферии окружности.

Причины конфликта по результатам моделирования вредной системы

«Материал колеса» проводит энергию к «Появлению трещин на поверхности окружности колеса маховика».

«Внутренние напряжения в колесе» преобразует энергию в вид, необходимый для работы «Появление трещин на поверхности окружности колеса маховика».

«Вращающееся колесо» поставляет энергию во вредную систему.

«Вращающееся колесо» координирует работу всех компонентов вредной системы.

Причины конфликта по результатам причинно-следственного анализа

Развиваются радиальные трещины в колесе маховика.

Одинаковые свойства материала маховика в радиальном и тангенциальном направлениях.

Разрушение материала по окружности маховика даёт начало трещины.

Колесо вращается с постоянной скоростью длительное время.

Существуют микродефекты в материале маховика.

Накапливается усталость материала колеса маховика.

Выберите гипотезу для решения

Для продолжения решения сейчас необходимо в правой колонке на вкладке «Гипотезы» выбрать одну (любую, желательно наиболее перспективную) гипотезу. Для этого кликните по кнопке «Стрелка влево» напротив нужной гипотезы.

В «Менеджере гипотез» вы можете проанализировать каждую гипотезу и сформулировать подходящую модель задачи.

Гипотеза 1

Г1. Устранить причину: «Одинаковые свойства материала маховика в радиальном и тангенциальном направлениях». Выполнить колесо маховика из материала, прочность которого в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном.

Выбор модели задачи

Модель задачи «Условия в оперативной зоне»

Модель задачи «Действие в оперативной зоне»

Модель задачи «Техническое противоречие»

Модель задачи «Физическое противоречие»

Сформулируйте модель задачи «Условия в оперативной зоне» (рис. 5)

Нужно выполнить колесо маховика структурированным по материалу.

Использовать материал, который мог бы обеспечить более высокую прочность в тангенциальном направлении и исключить передачу трещины к оси маховика в радиальном направлении.

Рекомендуемые преобразования

Ввести в оперативную зону новый компонент.

Преобразовать компонент оперативной зоны

Удалить компонент из оперативной зоны.

Укажите компонент в оперативной зоне для преобразования

Колесо маховика.

Какие атрибуты компонента «клей» и как нужно преобразовать?

Размер

Форма

Поверхность

Внутреннее пространство

Компонент с внутренней капиллярной структурой;

Компонент с использованием во внутреннем пространстве химического поля.



Рис. 5. Модель задачи «Условия в оперативной зоне»

Материал

Компонент из множества частей.

Динамичность**Управляемость****Другое****Модель решения**

Для создания требуемых условий нужно преобразовать компонент «Колесо маховика» следующим образом:

Внутреннее пространство: компонент с внутренней капиллярной структурой;

Ввести компонент с использованием во внутреннем пространстве химического поля;

Материал: выполнить компонент из множества частей

Требуется ли преобразовать систему?

Да

Нет

Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да

Нет

Предварительное решение (рис. 6)

Для создания требуемых условий нужно преобразовать компонент «Колесо маховика» следующим образом: внутреннее пространство – компонент с внутренней капиллярной структурой, компонент с использованием во внутреннем пространстве химического поля; материал – компонент из множества частей.

Решение: выполнить колесо маховика в виде катушки, намотанной из прочной ленты или прочной проволоки. Слои ленты или витки проволоки скрепить между собой при помощи клея.

Данное решение устраивает?

Да.

Нет.



Рис. 6. Предварительное решение: колесо маховика в виде катушки, из прочной ленты или прочной проволоки

Сформулируйте финальное решение

Для уравнивания колеса маховика выполнить его намотку из симметричных ветвей ленты. (рис. 6а) Для этого начинать навивку витков от середины ленты.

Гипотеза 2.

Г2. Устранить причину: «Колесо вращается с постоянной скоростью длительное время». При возникновении трещин в колесе маховика останавливать вращение колеса.

Выбор модели задачи

Модель задачи «Условия в оперативной зоне».

Модель задачи «Действие в оперативной зоне».

Модель задачи «Техническое противоречие».

Модель задачи «Физическое противоречие».

Формулировка модели задачи «Действие в оперативной зоне»**Укажите инструмент**

Затормаживатель разрушающегося колеса маховика.

Укажите действие

Затормаживать.

Укажите объект

Разрушающееся колесо маховика.

Что требуется исправить?

Инструмент слишком сложный.

Нет инструмента для выполнения нужного действия.

Полезное действие сопряжено с вредным.

Полезное действие избыточное.

Полезное действие недостаточное.

Выберите способ преобразования

Ввести в оперативную зону новый компонент – инструмент

Преобразовать компонент системы, чтобы он мог выполнять заданное действие.

Обеспечить выполнение действия полем.

Навивка ленты симметричными ветвями



Рис. 6а. К финальному решению: намотка из симметричных ветвей ленты

Модель решения

Для выполнения действия преобразовать компонент системы.

Какой компонент системы можно использовать?

Колесо
Вакуумированный корпус.
Магнитные подшипники.
Электромагнитная муфта.
Клей.

Ни один не подходит.

Какие атрибуты компонента «клей» и как нужно преобразовать?

Размер

Форма

Поверхность

Внутреннее пространство

Материал

Компонент из материала со способностью поглощения энергии/вещества.

Динамичность

Управляемость

Другое

Модель решения

Для создания требуемых условий нужно преобразовать компонент клей следующим образом: выполнить компонент «Клей» из материала со способностью поглощения энергии/вещества. Клей может поглощать энергию, разрывающую колесо маховика. Благодаря этому разрушение колеса будет идти от его периферии, начиная с края ленты (рис. 7). Тогда край ленты может автоматически выполнять функцию тормоза за счет трения о корпус маховика.

Требуется ли преобразовать систему?

Да.

Нет.

Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да.

Нет.



Рис. 7. К финальному решению: край ленты может автоматически выполнять функцию тормоза.

Предварительное решение

Выполнить колесо супермаховика навитым из ленты. Колесо маховика навито таким образом, что конец ленты располагается на его периферии. Витки ленты скрепить между собой клеем.

Благодаря этому возможное разрушение колеса будет начинаться с конца ленты. В этом месте (на периферии колеса) центробежная сила и разрывающие напряжения максимальны, поэтому получается что-то вроде «слабого звена», которое разрушается при чрезмерной нагрузке.

Оторванный край ленты будет выполнять функцию тормоза за счет трения о корпус маховика, постепенно останавливая его и предотвращая резкий выброс энергии разрушения.

Материал: компонент из материала со способностью поглощения энергии/вещества.

Данное решение устраивает?

Да.

Нет.

Сформулируйте финальное решение

Выполнить колесо маховика в виде катушки, намотанной из прочной ленты или прочной проволоки. Слои ленты или витки проволоки скрепить между собой при помощи клея.

Колесо маховика навито таким образом, что конец ленты располагается на его периферии. Витки ленты скрепить между собой клеем. Благодаря этому возможное разрушение колеса будет начинаться с конца ленты. В этом месте (на периферии колеса) центробежная сила и разрывающие напряжения максимальны, поэтому получается что-то вроде «слабого звена», которое разрушается при чрезмерной нагрузке. Оторванный край ленты будет выполнять функцию тормоза за счет трения о корпус маховика, постепенно останавливая его и предотвращая резкий выброс энергии разрушения (рис. 8).

Завершение проекта

Решение найдено – поздравляем!

В отчёте по проекту представлены все найденные решения в виде автоматически сгенерированной патентной формулы.

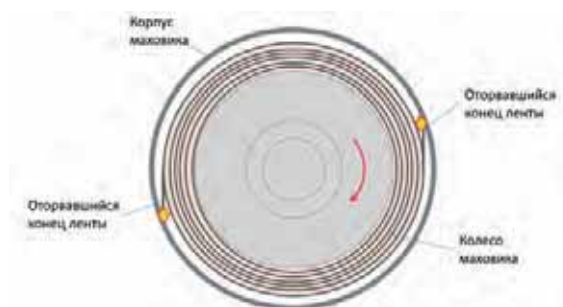


Рис. 8. К финальному решению

Заготовка патентной формулы

Пункт 1. Устройство для сохранения механическую энергию, включающее: колесо, вакуумированный корпус, магнитные подшипники, электромагнитная муфта, клей, в котором Выполнить колесо маховика в виде катушки, намотанной из прочной ленты или прочной проволоки. Слои ленты или витки проволоки скрепить между собой при помощи клея.

Колесо маховика навито таким образом, что конец ленты располагается на его периферии. Витки ленты скрепить между собой клеем. Благодаря этому возможное разрушение колеса будет начинаться с конца ленты. В этом месте (на периферии колеса) центробежная сила и разрывающие напряжения максимальны, поэтому получается что-то вроде «слабого звена», которое разрушается при чрезмерной нагрузке. Оторванный край ленты будет выполнять функцию тормоза за счет трения о корпус маховика, постепенно останавливая его и предотвращая резкий выброс энергии разрушения.

Пункт 2. Устройство по пункту 1, в котором для создания требуемых условий нужно преобразовать компонент «Колесо маховика» следующим образом: Внутреннее пространство – компонент с внутренней капиллярной структурой, компонент с использованием во внутреннем пространстве химического поля; Материал – компонент из множества частей

Пункт 3. Устройство по пункту 1, в котором необходимо выполнить колесо супермаховика навитым из ленты. Колесо маховика навито таким образом, что конец ленты располагается на его периферии. Витки ленты скрепить между собой клеем.

Благодаря этому возможное разрушение колеса будет начинаться с конца ленты. В этом месте (на периферии колеса) центробежная сила и разрывающие напряжения максимальны, поэтому получается что-то вроде «слабого звена», которое разрушается при чрезмерной нагрузке.

Оторванный край ленты будет выполнять функцию тормоза за счет трения о корпус маховика, постепенно останавливая его и предотвращая резкий выброс энергии разрушения.

Материал: компонент из материала со способностью поглощения энергии/вещества.

Комментарии к заготовке патентной формулы

Читатели могут заметить, что «Заготовка патентной формулы», представленная выше, не соответствует всем требованиям патентного ве-

домства по оформлению подобных документов. Это действительно так, но нужно понять, что программный продукт Solving Mill не относится к софту на основе искусственного интеллекта. Поэтому версии каждого пункта «Заготовки патентной формулы» нуждаются в содержательной и стилистической корректировке для того, чтобы стать основой описания созданного изобретения и формулы изобретения, соответствующей всем канонам патентного ведомства. Представленный выше материал из отчёта о работе с софтом Solving Mill 2.0. полезен как для начинающих, так и для опытных изобретателей, которые желают более основательно понять и применять его теоретическую основу – ОТСМ-ТРИЗ. Методологическая основа этого программного продукта разработана Шпаковским Н.А. и известна специалистам как АИПС (Алгоритм исправления проблемных ситуаций).

Знакомство читателей с материалами представленного отчёта о работе с программным продуктом Solving Mill 2.0. полезно для практики поиска реальных инновационных решений устройств, способов автоматизации технологических процессов, мехатронных модулей, робототехнических систем и других актуальных объектов целевого изобретательства.

**История появления и развития
накопителей энергии
типа «Маховик», эволюция роста
их энергоёмкости**

В качестве накопителей энергии маховики применяют уже не одно столетие. Но, как известно, качественный скачок в области их энергоёмкости произошел только на рубеже 50–60-х годов прошлого столетия. Это было связано с тем, что появились некоторые изобретения, которые подобны решениям, описанным выше в процессе применения ресурсов программного продукта Solving Mill 2.0.

Широкую известность в области накопителей энергии типа «Маховик» получили изобретения советского инженера Н.В. Гулия. На одну из своих конструкций в 1964 году он заявил авторские права и дал ей название «Супермаховик». Супермаховик выглядит как обычный, но внешняя его часть свита из прочной стальной ленты.

Н.В. Гулия в первую очередь собирался применить супермаховик как накопитель энергии для автомобилей и даже построил несколько образцов такого транспорта.

За счёт конструктивных особенностей супермаховик способен хранить до 500 Вт·ч (1,8 МДж) на килограмм веса.

Современный супермаховик представляет собой барабан, изготовленный из композитных материалов, например, намотанный из тонких витков стальной, пластичной ленты, стекловолокна или углеродных композитов. За счёт этого обеспечивается высокая прочность на разрыв и безопасность эксплуатации. При физическом разрушении супермаховик не разлетается на крупные части, как обычный маховик, а разрушается частично; при этом отделившиеся части тормозят барабан и предотвращают дальнейшее разрушение. Для уменьшения потерь на трение супермаховик помещается в вакуумированный кожух. Зачастую используется магнитный подвес [11].

Маховики как буферные устройства начали использоваться ещё во времена неолита, например, в устройстве гончарного круга.

За последние сто лет маховик претерпел ряд конструктивных изменений, позволивших ему запасать энергию на значительное время. Так, например, в 1950-х годах вакуумированные маховики использовались в экспериментальном общественном транспорте, в частности испытывались гиробусы.

Супермаховик сочетает в себе долговечность и умеренную цену, он безопасен при разрушении. КПД подобных накопителей энергии достаточно велик.

К минусам супермаховиков относят гироскопический эффект. Такой эффект обусловлен большим моментом импульса вращающегося маховика и препятствует изменению направления оси вращения маховика. Для исключения этого нежелательного эффекта (НЭ) при применении маховиков в качестве накопителей энергии на транспортных средствах можно применить подвеску маховика вкардановом подвесе, но это существенно усложняет конструкцию.

Ещё одним недостатком супермаховика является отсутствие отработанной простой трансмиссии, позволяющей использовать его на транспорте. В настоящий момент проводятся эксперименты по передаче энергии вращения супермаховика на колёса транспортного средства посредством супервариатора. Перспективным также является использование вакуумного супермаховика на магнитной подвеске в качестве источника электроэнергии для шаговых электродвигателей [11, 12].

Под научным руководством Н.В. Гулиа, российская компания Kinetic Power создала соб-

ственную версию стационарных накопителей кинетической энергии на базе супермаховика. Один такой накопитель способен запасать энергию до 100 кВт·ч и обеспечивать мощность до 300 кВт. В условиях российского рынка, кластер из нескольких таких накопителей способен обеспечивать выравнивание суточной неоднородности электрической нагрузки целого региона, заменяя собой дорогостоящие и громоздкие гидроаккумулирующие электростанции [11].

Несмотря на то, что автомобили, питающиеся от маховиков, не получили широкого распространения, транспорт остается одной из наиболее привлекательных отраслей применения супермаховиков. В частности, речь идет о железнодорожном транспорте. При торможении как пассажирского, так и грузового состава, впустую тратится огромное количество энергии. Супермаховик, подключенный к одной электрической сети с составом, способен улавливать и запасать энергию торможения, а позже выдавать её в сеть для разгона состава. Спасенная таким образом энергия позволит снизить потребление на 30%.

Помимо этого, супермаховики могут быть использованы для обеспечения бесперебойного питания объектов высших уровней ответственности. Уникальные свойства супермаховика обеспечивают отклик устройства на уровне сотых долей секунды, позволяя ни на секунду не прерывать подачу электроэнергии [11, 12].

Представляют интерес факты биографии одного из известных отечественных изобретателей в области создания и совершенствования накопителей энергии. Советский школьник Нурбей Гулиа начал заниматься этой темой в 15 лет. В те годы он решил изобрести «энергетическую капсулу» – так он назвал своё изобретение, которое должно было стать сопоставимой по энергоёмкости с баком бензина, но при этом копить в себе абсолютно безвредную для человека энергию. Первым делом автор опробовал аккумуляторы различных типов. Одним из самых безнадёжных вариантов оказался пружинный накопитель. Чтобы обычный легковой автомобиль проехал с таким аккумулятором 100 км пути, последний должен был весить 50 т.

Резиновый аккумулятор показался куда перспективнее: накопитель с зарядом на 100 км мог весить «всего» 900 кг. Автор даже разработал резиноаккумулятор инновационной конструкции для привода детской коляски и получил свое первое авторское свидетельство на изобретение [12].

Вскоре резину сменил сжатый воздух. И юный автор разработал инновационное устройство –

компактный гидрогазовый аккумулятор. Однако выяснилось, что при использовании сжатого газа энергетический «потолок» был невысок. Вскоре им был построен пневмокар с подогревом воздуха горелками. Эта машина получила высокую оценку у его друзей, но по своим возможностям была еще далека от того, чтобы конкурировать с автомобилем.

Маховики на транспорте можно использовать как в качестве аккумуляторов энергии, так и в виде гироскопов. Известность получил маховичный концепт-кар Ford Gyron (1961). Однако впервые гирокар был построен русским инженером Петром Шиловским значительно раньше, в 1914 году.

Эволюцию систем и устройств накопления энергии можно успешно изучать по творческим достижениям Н.В. Гулия. Будущий профессор оценил возможности конденсаторов, электромагнитов, собрал всю возможную информацию об электрохимических аккумуляторах. Он даже построил электромобиль. В качестве аккумулятора для него конструктор использовал батарею МАЗа.

Однако потенциал электрохимических аккумуляторов того времени Гулия не впечатлил. Не было и предпосылок тогда ожидать, что в области энергоемкости произойдет прорыв. Поэтому из всех накопителей энергии наиболее перспективными оказались механические аккумуляторы в виде маховиков, несмотря на то что тогда они значительно проигрывали электрохимическим накопителям.

Маховики тех лет, даже сделанные из самой лучшей стали, в пределе могли накопить только 30–50 кДж на 1 кг массы. Если раскручивать их быстрее, они разрывались, возникала авария. Даже свинцово-кислотные аккумуляторы с энергоемкостью 64 кДж/кг смотрелись на их фоне крайне выигрышно, а щелочные аккумуляторы с плотностью энергии 110 кДж/кг были вне конкуренции. Кроме того, уже тогда существовали очень дорогие серебряно-цинковые аккумуляторы: по удельной емкости (540 кДж/кг) они примерно соответствовали самым емким на сегодня литий-ионным аккумуляторам. Но изобретатель Гулия сделал ставку на столь далекий от совершенства маховик.

Чем выше частота вращения маховика, тем сильнее его частицы «растягивают» диск, пытаюсь его разорвать. Поскольку разрыв маховика дело страшное, конструкторам приходится закладывать высокий запас прочности. В результате

на практике энергоемкость маховика раза в три ниже возможной, и в начале 1960-х годов самые совершенные маховики могли запасать всего 10–15 кДж энергии на 1 кг. Если же применить более устойчивые к разрыву материалы, прочность маховика станет выше, но такой скоростной маховик становится опасным.

Получался порочный круг: прочность материала возрастает, а предельная энергоемкость увеличивается незначительно. Н.В. Гулия поставил своей задачей вырваться из этого замкнутого круга. На глаза изобретателю попался тросик, свитый из проволок, – такие обычно применяют в тренажерах для подъема тяжестей. Тросик был примечателен тем, что обладал высокой прочностью и никогда не рвался сразу. Именно этих качеств и не хватало маховикам того поколения.

В наше время благодаря высокой энергоемкости супермаховики нашли применение во многих областях. Их применяют в спутниках связи в качестве аккумулятора энергии, используют в электростанциях для повышения их КПД.

На *рис. 9* изображен маховичный накопитель, который применяют на электростанциях для повышения их КПД. Потери энергии в супермаховиках составляют всего 2% – это достигается, в том числе, за счет того, что он вращается в вакуумном кожухе на магнитных подшипниках.

Вызывает интерес описание экспериментов Н.В. Гулия с тросом. Он скатал из него маховик. Затем заменил проволочки тонкой стальной лентой такой же прочности – ее намотка была плотнее, а для надежности можно было склеить витки ленты между собой. Разрыв такого маховика уже не представлял опасности: при превышении предельной скорости первой должна была оторваться наиболее нагруженная внешняя лента. Она прижимается к корпусу и автоматически затормаживает маховик – никаких несчастных случаев, а оторванную ленту можно приклеить снова [12].

Первое испытание, когда ленточный маховик Гулия раскручивался от скоростного электромотора пылесоса, прошло успешно. Маховик вышел на максимальную частоту вращения безразрыва. А затем, когда ученому удалось испытать этот маховик на специальном разгонном стенде, выяснилось, что разрыв наступал только при скорости обода почти 500 м/с или плотности энергии около 100 кДж/кг. Изобретение Гулия в несколько раз превзошло по плотности энергии самые передовые на то время маховики и оставило позади свинцово-кислотные аккумуляторы.

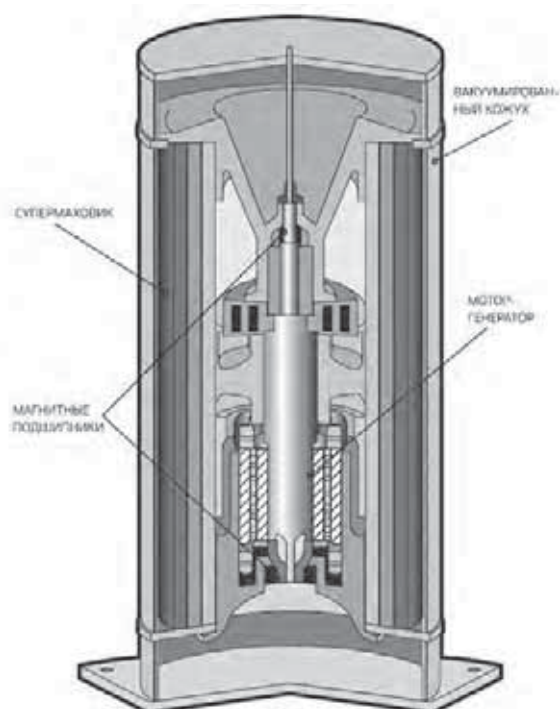


Рис. 9. Маховичный накопитель в вакуумированном кожухе

Через какое-то время после Гулиа супермаховик запатентовали в других странах, и спустя годы ему находят множество применений. В разных странах разрабатываются проекты маховичных машин. Отправляют супермаховики и в космос. Там для них особенно благоприятная среда: в космическом вакууме нет аэродинамического сопротивления, а невесомость устраняет нагрузки на подшипники. Поэтому на некоторых спутниках связи применяются супермаховичные накопители – они долговечнее электрохимических аккумуляторов и могут долгое время снабжать аппаратуру спутника энергией. Недавно стали рассматривать возможность применения супермаховиков в качестве источников бесперебойного питания для зданий.

Профессор Н.В. Гулиа создал очень удобную маховичную дрель, разработал первый в мире гибридный маховичный автомобиль на базе УАЗ-450Д – он оказался вдвое экономичнее обычной машины. Но главное – он продолжает совершенствовать разные элементы своей маховичной концепции, чтобы сделать ее по-настоящему конкурентоспособной.

Можно ли вывести супермаховик на уровень самых емких аккумуляторов? Оказывается, это не проблема. Если вместо стали использовать более

прочные материалы, то пропорционально вырастет и энергоёмкость. Причем, в отличие от электрохимических аккумуляторов, здесь практически нет потолка.

Супермаховик из кевлара на испытаниях при той же массе накапливал в четыре раза больше энергии, чем стальной. Супермаховик, навитый из углеволокна, может в 20–30 раз превзойти стальной по плотности энергии, а если использовать для его изготовления, например, алмазное волокно, то накопитель приобретет фантастическую энергоёмкость – 15 МДж/кг. Но и это предел: сегодня с помощью нанотехнологий на основе углерода создаются волокна фантастической прочности.

Профессор Н.В. Гулиа полагает, что если из такого материала навить супермаховик, плотность энергии может достичь 2500–3500 МДж/кг. А значит, 150-килограммовый супермаховик из такого материала способен обеспечить легковому автомобилю пробег в два с лишним миллиона километров содной прокрутки – больше, чем может выдержать шасси машины. Если объединить в одну схему супермаховик и супервариатор, расход привычного автомобиля можно снизить ниже 2 л/100 км [12].

За счет того, что супермаховик вращается в вакууме, а его ось закреплена в магнитной подвеске, сопротивление при вращении оказывается минимальным. Возможно, такой супермаховик может крутиться до остановки многие месяцы. Однако машина, способная работать в течение всего срока службы без заправок, пока еще не изобретена. Мощности современных электростанций определенно не хватит для зарядки таких серийных чудо-маховилей.

Но именно автотранспорт, считает профессор, самая подходящая сфера применения супермаховиков. И показатели машин проекта Н.В. Гулиа, на которых он планирует использовать супермаховики, не менее удивительные. По оценке ученого, «здоровый» расход топлива у бензинового автомобиля должен составлять примерно 1,5 л на 100 км, а у дизельного – 1,2 л.

Заключение

Представленный выше материал из отчёта о работе с софтом Solving Mill 2.0. полезен как для начинающих, так и для опытных изобретателей, которые желают более основательно понять и применять его теоретическую основу – ОТСМ-ТРИЗ. Методологическая основа этого программного продукта разработана

Шпаковским Н.А. и известна специалистам как АИПС (Алгоритм исправления проблемных ситуаций).

Знакомство читателей с материалами представленного отчёта о работе с программным продуктом Solving Mill 2.0. полезно для практики поиска реальных инновационных решений устройств, способов автоматизации технологических процессов, мехатронных модулей, робототехнических систем и других актуальных объектов целевого изобретательства.

Благодаря высокой энергоёмкости, супермаховикам нашли применение во многих областях. Их применяют в спутниках связи в качестве аккумулятора энергии, используют в электростанциях для повышения их КПД.

Благодаря творческим достижениям многих изобретателей в России и за рубежом, удаётся достигать значительного роста энергоёмкости супермаховиков. Так, например, супермаховик, навитый из углеволокна, может в 20–30 раз превзойти стальной по плотности энергии, а если использовать для его изготовления, например, алмазное волокно, то накопитель приобретёт фантастическую энергоёмкость – 15 МДж/кг.

Таким образом эволюция супермаховиков выводит их на уровень самых емких аккумуляторов. Если вместо стали использовать более прочные материалы, то пропорционально растёт их энергоёмкость. Причем, в отличие от электрохимических аккумуляторов, здесь практически нет толка.

Библиографический список

1. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие. – М.: Центр каталог, 2019. – 536 с. (Вузовский учебник). ISBN 978-5-903268-25-2.
2. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Особенности алгоритмов решения изобретательских задач и софта для поддержки процессов проектирования средств автоматизации инструментами ОТСМ-ТРИЗ-технологий. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научный журнал. Выпуск № 4 2018 г., с. 3–17.
3. Карлов А.Г. Структура систематических непрерывных инноваций в период перехода от традиционного производства к передовым производственным технологиям. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научный журнал. 2019. Том № 7, с. 11–17.

4. Карлов А.Г. Проблемы, ресурсы и альтернативы подготовки магистров инновационного проектирования техники и технологий. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научный журнал. 2020. Том № 9, с. 10–18.

5. Карлов А.Г. Инструментарий и методы развития навыков изобретательского мышления в процессе формирования системы компетенций магистров инновационного проектирования технологий и технических систем. Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 1 (52), 2020, с. 17–25.

6. Карлов А.Г., Филипович О.В. Ресурсы, альтернативы и противоречия образовательных программ подготовки инженеров цифровой экономики с компетенциями нетривиального изобретательского мышления. Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 1 (56), 2021, с. 23–32.

7. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Процедуры и результат применения софта Solving Mill 2.0. при модернизации установки для производства пластиковых гранул. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научный журнал. 2021. Том № 1(13), с. 3–12.

8. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Повышение надёжности работы оборудования для нанесения токопроводящего слоя на поверхность микросхемы на основе применения программного продукта Solving Mill 2.0. Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. Научный журнал. 2021. Том № 2(14), с. 3–14.

9. Карлов А.Г. Теоретическая и методологическая основа, функциональные возможности программного продукта Solving Mill 2.0. при создании инновационных технологий и технических систем автоматизации производства. Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 1 (60), 2022, с. 22–31.

10. Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ. Подходы и практика применения. – М.: Инфра-М, 2018. – 348 с.

11. Кинетические накопители энергии. <https://mig-energo.ru/kineticheskie-nakopiteli-energii/>

12. Диски высокой энергии: маховичный накопитель. <https://www.techinsider.ru/technologies/8424-diski-vysokoy-energii-makhovichnyy-nakopitel/>

References

1. Karlov A.G., Shpakovsky N.A. Ideas, inventions, innovations in the field of automation of technologies and technical systems: textbook. – M.: Center catalog, 2019. – 536 p. (University textbook). ISBN 978-5-903268-25-2.

2. Karlov A.G., Shpakovsky N.A. Features of algorithms for solving inventive tasks and software to support the processes of designing automation tools using OTSM-TRIZ technologies. Automation and measurement in machine and instrument engineering. Scientific Journal. Issue № 4, 2018, pp. 3–17.
3. Karlov A.G. The structure of systematic continuous innovations during the transition from traditional production to advanced production technologies. Automation and measurements in machine-instrument engineering. Scientific Journal. 2019. Volume № 7, pp. 11–17.
4. Karlov A.G. Problems, resources and alternatives for training masters in innovative engineering and technology design. Automation and measurement in machine and instrument engineering. Scientific Journal. 2020. Volume № 9, pp. 10–18.
5. Karlov A.G. Tools and methods for the development of inventive thinking skills in the process of forming a system of competencies of masters of innovative design of technologies and technical systems. Vestnik MSUT “STANKIN”, № 1 (52), 2020, pp. 17–25.
6. Karlov A.G., Filipovich O.V. Resources, alternatives and contradictions of educational programs for training digital economy engineers with competencies of non-trivial inventive thinking. Vestnik MSUT “STANKIN”, № 1 (56), 2021, pp. 23–32.
7. Karlov A.G., Shpakovsky N.A. Procedures and the result of using the Solving Mill 2.0. software during the modernization of the plant for the production of plastic pellets. Automation and measurement in machine and instrument engineering. Scientific Journal. 2021. Volume № 1(13), pp. 3–12.
8. Karlov A.G., Shpakovsky N.A. Improving the reliability of equipment for applying a conductive layer to the surface of a microcircuit based on the application of the Solving Mill 2.0. software product. Automation and measurements in machine and instrument engineering. Scientific Journal. 2021. Volume № 2(14), pp. 3–14.
9. Karlov A.G. Theoretical and methodological basis, functionality of the Solving Mill 2.0. software product in the creation of innovative technologies and technical systems for production automation. Vestnik MSUT “STANKIN”, № 1 (60), 2022, pp. 22–31.
10. Shpakovsky N.A. OTSM-TRIZ. Approaches and practice of application. – M.: Infra-M, 2018. – 348 p.
11. Kinetic energy storage. URL: <https://mig-energo.ru/kineticheskie-nakopiteli-energii/>
12. High energy disks: flywheel drive. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/8424-diski-vysokoy-energii-makhovichnyy-nakopitel/>

Карлов Антон Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» Политехнического института, Севастопольский государственный университет

antkar38cam@gmail.com

Karlov Anton Georgievich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Instrument systems and automation of technological processes” of Polytechnic institute, Sevastopol state university

antkar38cam@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The author have no conflicts of interest to declare.

2.5.4. РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В.А. Плотников, Г.К. Старых, А.А. Давтян, В.В. Серебряный
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Я.М. Каменев
НИЯУ МИФИ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLOV5 ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА СОРЕВНОВАНИЯХ ПО АВТОНОМНОЙ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ SINGAPORE AUV CHALLENGE

В статье рассматривается опыт применения сверточной нейросети архитектуры YOLOv5 для задачи распознавания подводных объектов на соревнованиях Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge. Необходимо детектировать и различать красные и желтые столбы, ворота, а также тазы синего и красного цветов, расположенные на зеленом полотне. В работе описаны все этапы настройки системы. Изначально сбор данных был произведен, используя воссозданную сцену бассейна в игровом движке Unity. Затем для дополнительного обучения использовались кадры из бассейна спорткомплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана, снятые на камеру с подводного аппарата. Разметка кадров из Unity была произведена автоматически, а кадры из реального бассейна размечались вручную. На промежуточных этапах нейросеть тестировалась в симуляторе Gazebo и в реальных условиях. На соревнованиях в Сингапуре было принято решение дообучить нейросеть для лучшей работы в новых условиях видимости и освещенности. В процессе подготовки дополнительных данных использовалась предыдущая версия нейросети для предварительной разметки.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, нейросеть, соревнования, техническое зрение, обучение, симулятор, машинное обучение, искусственный интеллект.

USING YOLOV5 NEURAL NETWORK FOR OBJECT DETECTION AT THE SINGAPORE AUV CHALLENGE

V.A. Plotnikov, G.K. Starykh, A.A. Davtyan, V.V. Serebrenny
Bauman Moscow State Technical University
Ya. M. Kamenev
National Research Nuclear University MEPHI

The article discusses the experience of using the convolutional neural network of the YOLOv5 architecture for the task of underwater objects detection at the Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge competitions. It is necessary to detect and distinguish red and yellow flares, gates, blue and red bowls located on a green carpet. The article describes all the stages of system implementation. Firstly, data was collected using a recreated pool scene in the Unity game engine. Then, for additional training, video recordings from the swimming pool of the sports complex of the Bauman Moscow State Technical University were used. The frames from Unity were marked up automatically, and the frames from the real pool were marked up manually. At the intermediate stages, the neural network was tested in the Gazebo simulator and in real conditions. At the competitions in Singapore, it was decided to train the neural network to work better in new conditions. For preliminary markup of preparing additional data, the previous version of the neural network was used.

Keywords: autonomous underwater vehicle, neural network, competitions, technical vision, learning, simulator, machine learning, artificial intelligence.

Введение

В автономной подводной робототехнике распознавание объектов входит в состав системы компьютерного зрения и играет одну из ключевых ролей, позволяя роботу взаимодействовать с видимыми объектами. Детектирование объектов под водой гораздо сложнее, чем на воздухе. Из-за разной освещенности и прозрачности воды система, работающая в одном бассейне или водоеме, может не работать в другом. Еще одна особенность заключается в том, что цвет объекта вблизи может сильно отличаться от цвета того же объекта на расстоянии. В то же время, подводное компьютерное зрение находит множество применений: исследовательские операции в морях и океанах, спасательные операции, мониторинг флоры и фауны и другие. Также компьютерное зрение играет ключевую роль для автономных подводных обитаемых аппаратов (АНПА), позволяя извлечь значительную часть информации об окружающем пространстве. Соревнования по подводной робототехнике являются упрощенной моделью реального применения подводных аппаратов, позволяющей разработчикам получить практический опыт в разработке систем управления, принятия решений и компьютерного зрения.

В статье рассматривается задача распознавания объектов соревнований по подводной робототехнике Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge (SAUVC) [1, 2]. Для решения задачи распознавания объектов была выбрана архитектура YOLOv5 [3].

Данная работа имеет следующую структуру. В следующих разделах приведено описание целевых соревнований и АНПА. Далее приведен раздел, посвященный первичной подготовке данных и обучению нейросети. Затем приведен раздел, в котором описывается тестирование нейросети в условиях соревнований и решение возникших проблем. В заключительном разделе приведено краткое изложение полученных результатов и выводов.

Соревнования SAUVC

В статье рассматривается задача распознавания объектов соревнований по подводной робототехнике SAUVC на изображении. Соревнования проходят в два этапа: квалификационный и основной. Во время

квалификационного этапа подводный аппарат должен проплыть через ворота на скорость. Квалификационные ворота расположены на расстоянии 10 метров от стартовой позиции. Основной этап делится на 3 подэтапа: прохождение ворот, сброс маркера в один из нескольких тазов, расположенных на зеленом полотне и локализация желтых столбов. Нейросеть, описанная в статье, применяется для распознавания объектов именно основного этапа соревнований. К ним относятся прямоугольные ворота, красный столб, желтые столбики, зеленое полотно с 4-мя тазами разного цвета, сами тазы с верхнего ракурса. Процесс прохождения ворот представлен на *рис. 1*, погружение АНПА «Кусто 3» на соревнованиях SAUVC 2022 представлен на *рис. 2*.



Рис. 1. АНПА «Кусто 3» проходит ворота во время выполнения основного задания соревнований



Рис. 2. Запуск аппарата для выполнения основного задания соревнований

АНПА «Кусто 3»

Алгоритмы компьютерного зрения, описанные в статье, используются на АНПА «Кусто 3». Данный аппарат был спроектирован и собран командой студентов в Учебно-научном молодежном центре (УНМЦ) Гидронавтика [4–9] для участия в соревнованиях по автономной подводной робототехнике, таких как: “SAUVC” [10], “RoboSub” [11], «Аквароботех» [12]. Этот АНПА разработан на базе предыдущей версии – гибридного необитаемого подводного аппарата «Кусто 2» [4].

Система технического зрения на АНПА «Кусто 3» предусматривает установку до 4-х видеокамер разного типа. На сегодняшний день на АНПА установлены две цифровые видеокамеры: одна расположена в отдельном прочном корпусе и направлена вниз относительно аппарата, вторая располагается под прозрачным акриловым куполом главного корпуса электроники и направлена в сторону маршевого движения аппарата.



Рис. 3. Подплытие аппарата к тазикам во время выполнения основного задания соревнований

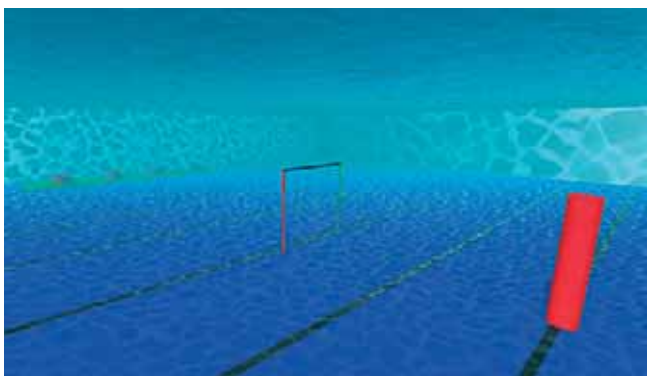


Рис. 4. 3D-модель ворот и красного столба в бассейне в симуляторе Unity

Система управления на АНПА «Кусто 3» разделена на нижний и верхний уровни. Система управления нижнего уровня реализована на микроконтроллере STM32 и отвечает за управление винтомоторными агрегатами (ВМА); обработку датчиков глубины, угловых скоростей, акселерометров и компаса; связь с отладочным пультом и с бортовым одноплатным компьютером Nvidia Jetson TX2. Система управления верхнего уровня разработана на базе фреймворка ROS [13] и включает в себя алгоритмы автономного управления, зрения, конечные автоматы принятия решений. На рис. 3 представлен АНПА «Кусто 3», выполняющий основной этап на соревнованиях SAUVC 2022.

Первоначальная подготовка данных и обучение

Для обучения нейронной сети YOLOv5 необходим большой объем данных (датасет), содержащий фотографии объектов соревнований. При этом организаторы соревнований SAUVC не представляют какой-либо датасет с фотографиями подводных объектов, только единичные фотографии.

На начальном этапе было решено сделать 3D-модель бассейна соревнований с объектами в симуляторе Unity. 3D-модель ворот и красного столба в бассейне представлена на рис. 4.

Датасет с изображениями моделей подводных объектов был сформирован автоматически с помощью специального скрипта, который менял расположение виртуальной камеры в пределах бассейна и автоматически добавлял разметку для каждого изображения. Объем получившегося датасета составил 500 изображений. Далее получившийся датасет был поделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 85 % к 15 % и использовался для обучения. Обучение выполнялось с использованием фреймворка PyTorch [14], на видеокарте Nvidia Quadro P4000. Количество эпох обучения – 300. Для сравнения качества распознавания объектов использовалась метрика mean average precision (mAP). mAP на тестовой выборке после обучения составил 0.791.

Для тестирования обученной на данных из симулятора нейросети были сделаны максимально похожие копии подводных объектов соревнований. Тестирование проводилось в бассейне спорткомплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана, в процессе которого стало понятно, что качество распознавания на реальных объектах очень низкое.

Для повышения качества распознавания подводных объектов была произведена подводная



Рис. 5. Распознавание тестового изображения из бассейна

съемка объектов. Далее был использован скрипт для разбиения видео на кадры. Затем каждое изображение было вручную размечено с помощью программы LabelImg [15]. В датасет вошли как изображения, содержащие один объект, так и изображения с несколькими объектами. Объем новых данных составил 914 изображений, из которых были сформированы обучающая и тестовая выборки в том же соотношении. Далее существующий датасет был дополнен новыми данными и на увеличенном датасете

была заново переобучена нейросеть YOLOv5. mAP на тестовой выборке после обучения составил 0.813.

Пример распознавания ворот и красного столба в бассейне спорткомплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана представлен на рис. 5.

Применение нейросети в условиях соревнований

Одно из преимуществ применения нейросетей для распознавания объектов перед применением классических методов – это робастность к слабым изменениям параметров среды. Однако во время тестовых запусков авторы опять столкнулись с низким качеством распознавания – резкое изменение прозрачности и наличие прямого солнечного света оказали сильное влияние на результат работы нейросети. В связи с этим появилась необходимость добавить в датасет новые данные с измененными параметрами среды и переобучить нейросеть. Подводные объекты были сняты в нескольких бассейнах на разной глубине и под разными углами. Используя уже имеющуюся нейросеть, новые данные были автоматически предразмечены, что позволило существенно уменьшить временные затраты на ручную разметку данных. Процесс разметки новых данных в программе LabelImg представлен на рис. 6.

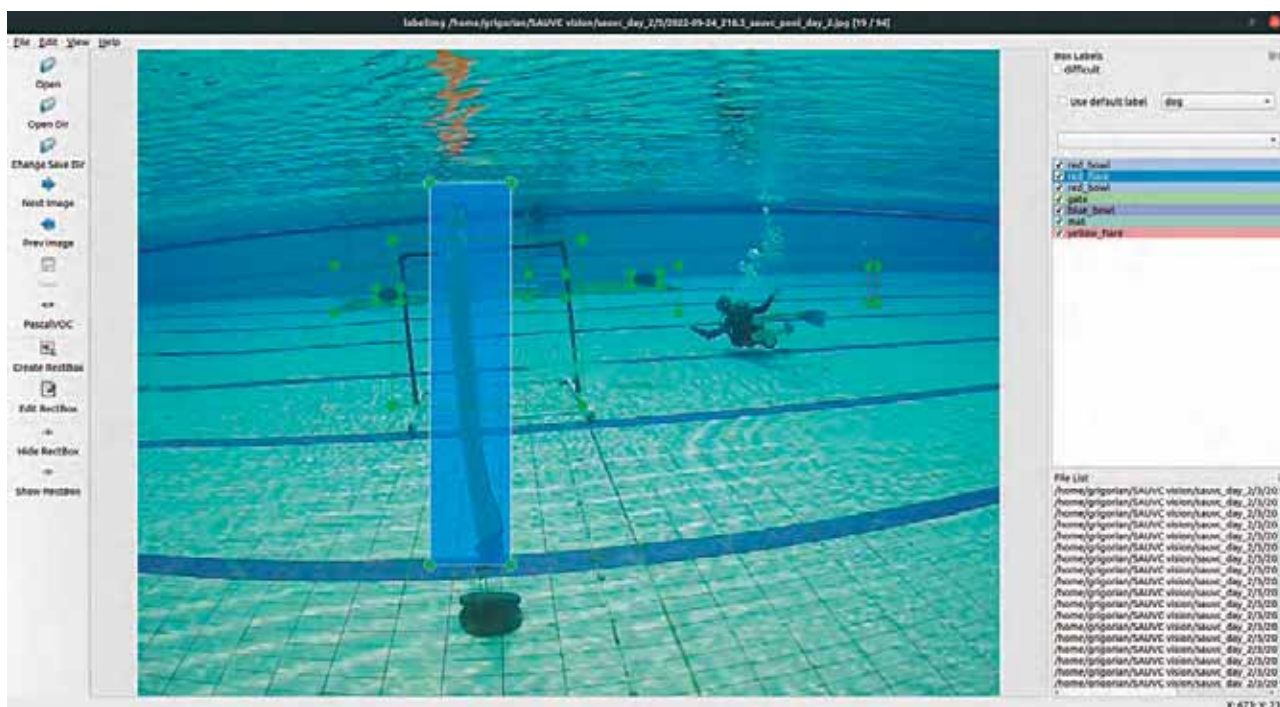


Рис. 6. Разметка данных из бассейна соревнований SAUVC в программе LabelImg

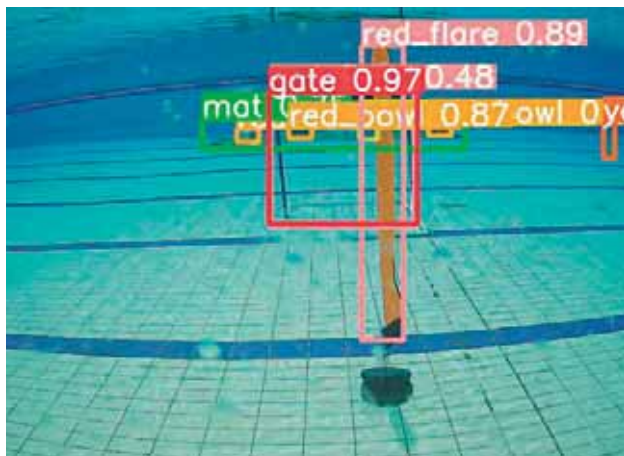


Рис. 7. Распознавание объектов на соревнованиях SAUVC 2022

Объем новых данных составил 914 изображений. В результате общее число изображений составило 2328 шт.

Процесс дообучения был выполнен с помощью удаленной рабочей станции в Москве, доступ к которой осуществлялся с помощью SSH и Anydesk.

mAP на тестовой выборке после обучения составил 0.745.

Пример распознавания объектов на соревнованиях SAUVC 2022 представлен на *рис. 7*.

Заключение

В данной работе рассмотрен опыт применения сверточной нейросети архитектуры YOLOv5 для задачи распознавания подводных объектов на соревнованиях Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge, описаны методы сбора и подготовки данных для обучения, сам процесс обучения и тестирования. Проблема низкого качества распознавания в условиях соревнований полностью решается дообучением на данных с новыми параметрами среды. Применение уже имеющейся нейросети для авторазметки данных существенно ускоряет процесс подготовки нового объема данных для обучения. Также одним из возможных решений проблемы распознавания в новых условиях среды без дообучения является вариант, в котором изначально формируется датасет с максимально разными параметрами такими как: интенсивность освещения, угол падения освещения, прозрачность воды, цвет воды, цвет объектов, угол съемки и расположение в кадре объектов. В таком случае маловероятно, что понадобится дообучать нейросеть на месте, однако изначальный процесс сбора данных займет в разы больше времени.

Библиографический список

1. Plotnikov, Vladislav & Akhtyamov, T. & Kopanov, Pavel & Serebrenny, Vladimir. (2022). Classical and neural network approaches to object detection in underwater robotics competitions. 020021. 10.1063/5.0083975.
2. The Singapore AUV Challenge 2022 Rulebook // URL: <https://sauvc.org/rulebook/> (дата обращения: 05.10.2022)
3. YOLOv5 documentation // URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата обращения: 05.10.2022)
4. Студенческий конкурсный гибридный необитаемый подводный аппарат «Кусто II» / В.А. Плотников, Я.М. Каменев, И.Ю. Литик, М.А. Борзенков // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, Москва, 18–28 февраля 2019 года. – Москва: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2019. – С. 142–143.
5. Автоматизация сбора экологических данных и поиск габаритного мусора и затонувшей техники гибридным необитаемым подводным аппаратом / А.А. Солодихина, Я.В. Боннет, И.С. Семенюк [и др.] // Байкал 2018 : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Ольхонский район, 11–20 июня 2018 года. – Ольхонский район: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2018. – С. 223–228.
6. Конструкция модуля стереоскопической камеры и программный алгоритм для распознавания водолаза / В.А. Плотников, К.А. Драчев, В.М. Софьин, В.В. Серебрянный // Каспий в цифровую эпоху: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием в рамках Международного научного форума «Каспий 2021: пути устойчивого развития», Астрахань, 27 мая 2021 года / Астраханский государственный университет. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2021. – С. 115–117.
7. Конструкция гибридного робототехнического комплекса «Кусто II» / В.А. Плотников, Д.В. Затекин, К.А. Драчев [и др.] // Каспий в цифровую эпоху: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием в рамках Международного научного форума «Каспий 2021: пути устойчивого развития», Астрахань, 27 мая 2021 года / Астраханский государственный университет. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2021. – С. 118–121.

8. Северов С.П. Инновационные технологии профессиональной подготовки инженеров подводной робототехники и морской индустрии в России. Электронное науч.-техн. издание «Наука и образование». 10 октября 2011.

9. Особенности проектирования малогабаритного пульта управления подводного аппарата для соревнования / Спицына А.В., Чернышова Л.М., Рязанцев Т.А., Затекин Д.В., Старых Г.К. // В книге: Студенческая научная весна. Всероссийская студенческая конференция: сборник тезисов докладов. Москва, 2021. С. 141–142.

10. Pallayil, V., Chitre, M., Kalyan, B., Suman, S., Beng Koay, T., Chia, C. S., ... Taher, T. (2015). The Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge (SAUVC): An effort to engage and expose young engineers to challenges of underwater robotics. OCEANS pp. 1–9 2015 – Genova.

11. RoboSub 2021 Mission and Scoring_V1 // URL: https://robonation.org/app/uploads/sites/4/2021/03/RoboSub-2021-Mission-and-Rules_V1.pdf (дата обращения: 05.10.2022)

12. Всероссийские соревнования по морской робототехнике «Аквароботех-2020» // URL: https://www.msun.ru/ru/culture_robotics_aqua2020 (дата обращения: 05.10.2022)

13. Stingray – ROS based framework for autonomous underwater vehicles (AUV) // URL: <https://github.com/hydronautics-team/stingray> (дата обращения: 05.10.2022)

14. Py Torch framework // URL: <https://pytorch.org/> (дата обращения: 05.10.2022)

15. LabelImg graphical image annotation tool // URL: <https://github.com/heartexlabs/labelImg> (дата обращения: 05.10.2022)

References

1. Plotnikov, Vladislav & Akhtyamov, T. & Kopanov, Pavel & Serebrenny, Vladimir. (2022). Classical and neural network approaches to object detection in underwater robotics competitions. 020021. 10.1063/5.0083975.

2. The Singapore AUV Challenge 2022 Rulebook // URL: <https://sauvc.org/rulebook/> (дата обращения: 05.10.2022)

3. YOLOv5 documentation // URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата обращения: 05.10.2022)

4. Student competitive hybrid uninhabited underwater vehicle «Cousteau II» / V.A. Plotnikov, Ya.M. Kamenev, I.Y. Litik, M.A. Borzenkov // Interuniversity Scientific and Technical Conference

of Students, Postgraduates and Young Specialists named after E.V. Armensky, Moscow, February 18–28, 2019. – Moscow: Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the Higher School of Economics, 2019. – pp. 142–143.

5. Automation of environmental data collection and search for dimensional debris and sunken equipment by a hybrid uninhabited underwater vehicle / A.A. Solodikhina, Ya.V. Bonnet, I.S. Semenyuk [et al.] // Baikal 2018: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Olkhonsky district, June 11–20, 2018. – Olkhonsky district: Irkutsk National Research Technical University, 2018. – pp. 223–228.

6. The design of the stereoscopic camera module and a software algorithm for diver recognition / V.A. Plotnikov, K.A. Drachev, V. M. Sofyin, V.V. Serebrenny // Caspian in the digital age: materials of the National Scientific and Practical Conference with international participation in the framework of the International Scientific Forum «Caspian 2021: ways of sustainable development», Astrakhan, May 27 2021 / Astrakhan State University. – Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University», 2021. – pp. 115–117.

7. The design of the hybrid robotic complex «Cousteau II» / V.A. Plotnikov, D.V. Zatekin, K.A. Drachev [et al.] // The Caspian in the digital age: materials of the National Scientific and Practical Conference with international participation in the framework of the International Scientific Forum «Caspian 2021: ways of sustainable development», Astrakhan, May 27, 2021 / Astrakhan State University. – Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University», 2021. – pp. 118–121.

8. Severov S.P. Innovative technologies of professional training of engineers of underwater robotics and marine industry in Russia. Electronic science and technology the publication «Science and Education». October 10, 2011.

9. Features of designing a small-sized control panel of an underwater vehicle for competition / Spitsyna A.V., Chernyshova L.M., Ryzantsev T.A., Zatekin D.V., Starykh G.K. // In the book: Student Scientific Spring. All-Russian Student Conference: collection of abstracts. Moscow, 2021. pp. 141–142.

10. Pallayil, V., Chitre, M., Kalyan, B., Suman, S., Beng Koay, T., Chia, C. S., ... Taher, T. (2015). The Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge (SAUVC): An effort to engage and expose young engineers to challenges of underwater robotics. OCEANS pp. 1–9 2015 – Genova.

11. RoboSub 2021 Mission and Scoring_V1 // URL: https://robonation.org/app/uploads/sites/4/2021/03/RoboSub-2021-Mission-and-Rules_V1.pdf (accessed: 05.10.2022)

12. All-Russian competitions in marine robotics «Aquarobotech-2020» // URL: https://www.msun.ru/ru/culture_robotics_aqua2020 (accessed: 05.10.2022)

13. Stingray – ROS based framework for autonomous underwater vehicles (AUV) // URL: <https://github.com/hydronautics-team/stingray> (accessed: 05.10.2022)

14. Py Torch framework // URL: <https://pytorch.org/> (accessed: 05.10.2022)

15. LabelImg graphical image annotation tool // URL: <https://github.com/heartexlabs/labelImg> (accessed: 05.10.2022)

Плотников Владислав Александрович – аспирант кафедры «Мехатроника и Робототехника», факультет «Специальное машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана

vladislav.a.plotnikov@yandex.ru

Старых Григорий Константинович – бакалавр факультета «Специальное машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана

grishafv@gmail.com

Каменев Ярослав Максимович – аспирант кафедры № 2, НИЯУ МИФИ

kamenev.yar@gmail.com

Давтян Артём Артурович – бакалавр кафедры «Системы автоматизированного проектирования», факультет «Робототехника и комплексная автоматизация», МГТУ им. Н.Э. Баумана

myaghkov16@gmail.com

Серебрённый Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», факультет «Специальное машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана

vsereb@bmstu.ru

Plotnikov Vladislav Aleksandrovich – postgraduate student at the department of “Mechatronics and Robotics”, faculty of “Special Engineering”, Bauman Moscow State Technical University

vladislav.a.plotnikov@yandex.ru

Sarykh Grigory Konstantinovich – bachelor student at the department of “Underwater robots and Vehicles”, faculty of “Special Engineering”, Bauman Moscow State Technical University

grishafv@gmail.com

Kamenev Iaroslav Maksimovich – postgraduate student at the department № 2, National Research Nuclear University MEPHI

kamenev.yar@gmail.com

Davtyan Artyom Arturovich – bachelor student at the department of “Computer aided design”, faculty of “Robotics and complex automation”, Bauman Moscow Technical University

myaghkov16@gmail.com

Serebrenny Vladimir Valerievich – candidate Sc. of Engineering, docent, Head of the department of SM7 “Robotic Systems and Mechatronics”, faculty of “Special Engineering”, Bauman Moscow State Technical University

vsereb@bmstu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК: 629.336

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ ПРИ ПОВОРОТЕ ДЛЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Я. Вассуф, В.В. Серебряный
МГТУ им. Н.Э. Баумана
А.В. Тарасенко, М.В. Коржуков
ООО «ИЦ «КАМАЗ»

Аннотация

По статистике, одними из самых распространенных причин ДТП являются неправильный проезд перекрестков, перестроение на соседнюю полосу. Для предотвращения или уменьшения количества ДТП по данным причинам, в статье предлагается система помощи при повороте (СПП). Система относится к нулевому уровню передовых систем помощи водителю (СПВ). Алгоритм базируется на отслеживании положения обнаруженных объектов на перекрестках во время поворота и предупреждении водителя о вероятности столкновения. СПП выполняет три основные задачи: обнаружение объектов на дороге во время поворота, отслеживание траектории объектов и предупреждение водителя о возможном столкновении с транспортным средством. С помощью расширенного фильтра Калмана реализуется отслеживание и прогнозирование положения обнаруженного объекта. В статье проводится сравнение между моделями на базе фильтра Калмана постоянной скорости и моделью постоянного ускорения. Верификация системы проводится с использованием моделирования в среде MATLAB и Simulink.

Ключевые слова: система помощи водителю при повороте, радарная система, расширенный фильтр Калмана, разработчик сценария вождения, мехатроника автомобиля.

DEVELOPMENT OF A DRIVER ASSISTANCE SYSTEM WHILE TURNING FOR PUBLIC TRANSPORT

Ya. Wassouf, V.V. Serebrenny
Bauman Moscow State Technical University
A.V. Tarasenko, M.V. Korzhukov
LLC "IC "KAMAZ"

Abstract

According to statistics, one of the most common causes of accidents is the wrong passage of intersections. To prevent or reduce the number of accidents for these reasons, the article proposes a turn assist system (TAS). The system belongs to the zero level of advanced Driver Assistance Systems (ADAS). The algorithm is based on tracking the position of detected objects at intersections during turning and warn the driver about a collision. TAS has three main tasks: detecting objects on the road during turning, tracking the trajectory of these objects and warning the driver about a possible collision with the vehicle. With the help of the extended Kalman filter, tracking and forecasting of the position of the detected object is implemented. The article compares the models based on the constant velocity Kalman filter and the constant acceleration model. Verification of the system is carried out using simulation in the MATLAB and Simulink environments.

Keywords: driver turn assist system, radar system, extended Kalman filter, driving scenario designer, mechatronics of the vehicle.

Введение

Перекрестки в городских условиях являются одним из самых сложных и вызывающих вопросов в области автономного вождения. Эти сценарии чреватые несчастными случаями: многочисленные статистические данные о дорожно-транспортных происшествиях показывают, что 60% серьезных дорожно-транспортных происшествий связаны с перекрестками. По этим причинам для автономного транспортного средства является важным анализ обстановки, на основе которой будут приниматься безопасные и эффективные решения, а затем разрабатываться надежные стратегии вождения [1].

Одной из основных причин такого высокого уровня аварийности является большой объем информации, которую водитель воспринимает из окружающей среды. Например, на перекрестке водитель должен быть осведомлен о сигналах дорожного движения, таких как знаки дорожного движения и светофоры, и в то же время должен следить за другими транспортными средствами и оценивать их скорость и траекторию движения.

Поскольку на перекрестках высока вероятность ДТП, для повышения безопасности мы предлагаем новую систему помощи водителю при повороте на перекрестке в опасных ситуациях (опасные ситуации показаны на *рис. 1*).

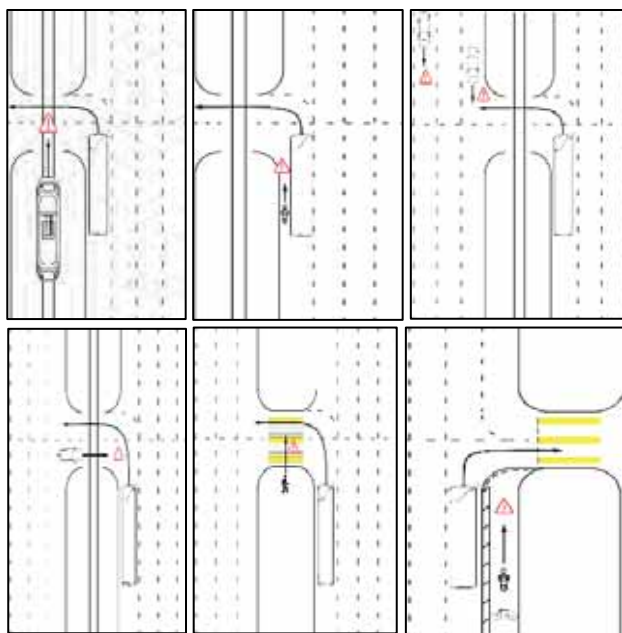


Рис. 1. Опасные ситуации на дороге при повороте

Система помощи при повороте (СППП) устанавливается на серийные пассажирские автобусы, электробусы и троллейбусы, непрерывно анализирует окружающую обстановку и сообщает водителю о потенциальной опасности столкновения при осуществлении поворота по ходу движения транспортного средства (ТС).

Предложенная система принадлежит к нулевому уровню систем помощи водителю, которые принимаются в области автоматизации и мехатроники автомобилей [2]. Система оповещения обеспечивает только предупреждение и не оказывает воздействия на управление.

СППП создается с целью своевременного предупреждения, обнаружения и предотвращения и/или снижения вероятности потенциальной угрозы, а также возможных последствий потенциально опасных дорожных ситуаций и происшествий, возникновения ситуаций высокого риска причинения вреда механическим транспортным средствам, пешеходам и иному движимому имуществу, нарушений правил дорожного движения, обеспечивающегося посредством мониторинга окружающей дорожной сцены с последующим уведомлением и информированием водителя в автоматическом режиме.

Установленная на ТС СППП должна сохранять регламентированную безотказную работоспособность в период эксплуатации ТС, в любое время года, при использовании в работе на скоростях от 0 до 30 км/ч (согласно ГОСТ Р 58808 – 2020. Автомобильные транспортные средства. Системы мониторинга слепых зон).

Сопутствующие работы

Существуют аналоги системы, которые помогают водителю при повороте налево. Поворот налево на часто используемых, частично не просматриваемых перекрестках, может привести к опасности. Система помощи при повороте налево выявляет встречные транспортные средства, предупреждает водителя с помощью визуальных и звуковых сигналов и может активировать торможение для смягчения или полного предотвращения возможного столкновения. Для обнаружения встречных транспортных средств применяются ультразвуковые датчики, радарные датчики и интеллектуальные системы камер [3].

Исходя из погодных условий, возможной пыли и грязи, было принято решение использовать радар. Радар обладает способностью работать в различных климатических ситуациях и на высоких скоростях, в отличие от лидара и камеры [4].

Система должна всегда определять и отслеживать объекты на дороге с помощью радара. Для этого используется несколько методов и алгоритмов отслеживания и прогнозирования (Фильтр Калмана), и кластеризации (K nearest neighbors и DBSCAN) [5].

Фильтр Калмана является оптимальным замкнутым решением для линейных систем, в то время как для нелинейных систем очень трудно или даже невозможно получить точное оптимальное решение. Таким образом, предложено множество методов субоптимальной приближенной фильтрации [6]. Методы нелинейной фильтрации можно разделить на пять типов [7]: 1) расширенная фильтрация Калмана (Extended Kalman Filter EKF); 2) интерполяционная фильтрация; 3) фильтрация Калмана без запаха (Unscented Kalman Filter UKF); 4) фильтрация частиц; 5) фильтрация нейронной сети. Наиболее широко используемым методом нелинейной фильтрации является EKF, который преобразует нелинейные проблемы в линейные проблемы, а затем в нем может быть применена теория линейной фильтрации. Этот метод обычно рассматривается как неоптимальный метод. Ключевым моментом нелинейной фильтрации является поиск эффективной линейной аппроксимации. Интерполяционная фильтрация использует интерполяционный полином для работы с линейной аппроксимацией, основанной на интерполяционной формуле Стирлинга. UKF не нуждается в линеаризации. Это позволяет аппроксимировать функцию плотности вероятности вектора состояния серией выбранных точек выборки. Фильтрация частиц – это алгоритм фильтрации, основанный на Монте-Карло и рекурсивной байесовской оценке. Это предполагает получение ряда оценочных значений в соответствии с выборками, полученными с помощью апостериорного распределения вероятностей. Когда частиц достаточно, статистические свойства частиц можно рассматривать как статистические свойства апостериорного распределения вероятностей. Сигмоидальные многослойные нейронные сети с прямой связью могут реализовывать произвольную непрерывную нелинейную функцию с произвольной точностью, которая применяется для фильтрации нейронных сетей.

Много исследований изучают методы повышения безопасности, такие как: система предупреждения о столкновении [8], система мониторинга слепых зон [9], система выхода из полосы [10], система торможения [11], системы управления компромиссом между комфортом и управляемостью [12–14].

В работе [15] представлен обзор существующих методов и алгоритмов распределения задач между человеком и коллаборативными роботами. Задача

предупреждения водителя также рассматривается как коллаборативный метод взаимодействия машины и водителя.

В работе [16] фильтр Калмана использует прогноз с последующей коррекцией для определения состояний фильтра.

В работе [17] предложено решение проблемы навигации робототехнических систем. Цель решения заключается в обеспечении поддержки постоянного радиосигнала между робототехническим комплексом и удаленной системой управления, используемой в сельском хозяйстве.

Данное исследование посвящено разработке новой системы помощи водителю при повороте. Рассматривается архитектура системы и функции. Также используется расширенный фильтр Калмана и рассматриваются две модели: модель постоянной скорости и модель постоянного ускорения. Система тестируется в Simulink с помощью пакета для создания сценариев Driving Scenario Designer.

Требования к системе

Функциональность СППП должна осуществлять непрерывное выявление всех участников дорожного движения, попадающих в поле зоны детекции, при движении вперед в рамках мониторинга дорожной сцены. В случае выявления высокого риска столкновения с другими транспортными средствами, такими как легковые и грузовые автомобили, мотоциклы, велосипеды, пешеходы и им подобные по габаритам, подсистема мониторинга передает соответствующий сигнал в модуль взаимодействия с системами предупреждения водителя.

Дальность обнаружения механических транспортных средств (зона детекции) должна составлять не менее 70 метров по ходу движения ТС.

Объекты, которые должны быть определены радаром, представлены в *табл. 1*. Зоны обнаружения объектов представлены на *рис. 2*.

Отправка сигнала на оповещение водителя об обнаружении механических транспортных средств, находящихся на траектории прямолинейного движения ТС, должна осуществляться не более чем за 0,3 секунд после появления ТСМ-объекта в зоне детекции.

СППП должна непрерывно передавать данные о своём состоянии на регламентированный контроллер слежения и контроля за установленными на ТС модулями систем помощи водителю, применяемый в блоке управления.

Описание классов детектирования объектов радаром

Ширина луча ДН по азимуту, °	Дальность обнаружения, м				
	Грузовой автомобиль (ЭПР ≥ 40 м ²)	Легковая машина (ЭПР ≥ 10 м ²)	Мотоциклист (ЭПР ≥ 3 м ²)	Велосипедист (ЭПР ≥ 1 м ²)	Пешеход (ЭПР ≥ 0,2 м ²)
±45	100	70	55	40	30
±60	30	40	30	25	15

Управление настройками системы, изменение параметров и отладочная диагностика должны производиться с использованием унифицированных диагностических сервисов, удовлетворяющих требованиям стандарта ISO 14229-1:2013 (Дорожные транспортные средства (УДС) – Часть 1: Описание и требования).

Структура системы помощи водителю при повороте должна представлять собой программно-аппаратный комплекс, включающий датчики для получения информации о происходящем на дороге, такие как радары ближнего и среднего действия, взаимодействующие с ресурсами бортового вычислительного аппарата, содержащего модуль интеграции и обмена данными с электронными компонентами ТС. Блок управления системой должен состоять из вычислительного и логического модулей.

Вычислительный модуль отвечает за получение данных с радаров, обработку данных, детектирование и классификацию объектов.

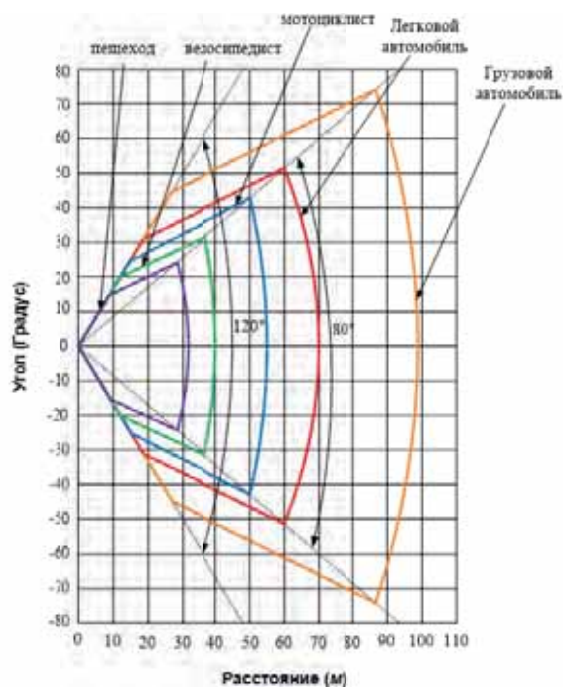


Рис. 2. Диаграмма детектирования объектов радаром

Подсистема обработки данных с радара начинает работу с момента включения зажигания. Время запуска подсистемы не должно превышать 20 секунд. Подсистема должна выполняться на вычислительном модуле.

Подсистема обработки данных с радара принимает значения с радара по шине передачи данных и осуществляет определение местоположений в радарной системе координат, скоростей и предполагаемых типов препятствий (перечень препятствий приведен в табл. 1), найденных радаром. Данные о препятствиях передаются на подсистему информирования водителя.

Требования к режимам функционирования системы

Система должна выполнять следующие функции:

- обнаружение транспортных средств;
- определение параметров относительного положения и динамики обнаруженного транспортного средства по отношению к оснащенной системой ТС;
- определение интервала между ТС-объектом и ТС;
- отправка сигнала на предупреждение водителя в соответствии с функциями и требованиями к системе.

Функциональная схема работы СППП представлена на рис. 3.

Система осуществляет следующие режимы функционирования: штатный режим, режим диагностики, аварийный режим.

В штатном режиме работы СППП должна обеспечивать непрерывную функциональность на скоростях до 30 км/ч, при включении указателя поворота. При штатном режиме, система должна оповещать водителя звуковым сигналом и сообщением на бортовой панели об опасных ситуациях при повороте.

В режиме диагностики СППП должна включать в себя средства подсистемы самодиагностики, включающие в себя возможность автоматической



Рис. 3. Функциональная схема СППП



Рис. 4. Общая схема работы системы

самодиагностики и вывода соответствующих уведомлений при выявлении неисправностей, а также возможность предоставления доступа к журналам работы и дампам полученных данных квалифицированным специалистам.

Первичная самодиагностика по времени не должна превышать 2 секунды со времени инициализации функций системы.

СППП должна содержать проверки правильности показания датчиков через косвенные проверки по значениям смежных систем. При получении противоречивых показаний должны быть разработаны сценарии поведения.

Бортовая подсистема самодиагностики должна быть достаточной для обеспечения оперативного информирования водителей и специалистов по диагностике системы об активных, пассивных ошибках и состоянии части характерных сигналов системы в момент возникновения ошибок. Внешняя диагностика должна включать сервисы, обеспечивающие следующий функционал:

- чтение/запись диагностических кодов;
- чтение сигналов и значений параметров;
- запуск тестов;
- загрузка параметров;
- загрузка программного обеспечения.

При аварийном режиме система должна выдавать информацию на бортовую панель об ошибке, а также звуковое оповещение. Также система должна выдавать код ошибки. Все коды ошибок должны быть расшифрованы и выписаны в отдельной таблице в отчетной документации. При выявлении ошибок система не должна работать до устранения неполадок.

Для СППП возможны следующие аварийные ситуации, которые влияют на надежность работы системы:

- сбой в электроснабжении оборудования (физический обрыв провода питания оборудования или недостаток напряжения);
- сбой программного обеспечения (утечка памяти, перегрузка каналов передачи данных, зависание одного из модулей);
- загрязнение или повреждение датчиков.

Функционирование системы определяется структурой, представленной на рис. 4.

Сценарий разрабатывается через Scenario Drive в среде MATLAB. Радары собирают данные об окружающей среде, определяя относительное расстояние, скорость и ускорение. С радаров поступает облако точек, которые никак друг с другом не связаны. Каждый объект определяется с помощью алгоритма кластеризации (DBSCAN), который выделяет из облака точек отдельные кластеры. И затем на вход фильтра Калмана поступает информация о кластере. Задача системы – отследить местоположение этого кластера в пространстве и выдать оповещение в случае возможного столкновения с ТС. Алгоритм кластеризации и отслеживания через расширенный фильтр Калмана, условия активации и предупреждения рассматриваются далее.

Кластеризация с помощью алгоритма DBSCAN

DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) требует только двух параметров: Эпсилон и Min Points. Эпсилон – это радиус окружности, которая должна быть создана вокруг каждой точки данных для проверки плотности, а Min

Алгоритм DBSCAN

Алгоритм: Псевдокод исходного последовательного алгоритма DBSCAN
<p>Вход: БД (База данных), ϵ радиус, $min\ Pts$: Порог плотности, $dist$: Функция расстояния. Дата: $label$: точечная метка, в начале undefined</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. for point p in data base DB do 2. if $label(p) \neq undefined$ then continue // Повторить по каждой точке 3. Neighbors $N = Range\ query(DB, dist, p, \epsilon)$ // Пропустить обработанные точки 4. If $abs(N) < min\ Pts$ then // Найти начальных соседей 5. $label(p) = Noise$ // Неосновные точки – это шум 6. continue 7. $c = next\ cluster\ label$ 8. $label(p) = c$ // Запустить новый кластер 9. Seed set $S = N \setminus \{p\}$ // Расширить район 10. for q in S do 11. if $label(q) = Noise$ then $label(q) = c$ 12. if $label(q) \neq undefined$ then continue // Проверка основной точки 13. Neighbors $N = Rangequery(DB, dist, q, \epsilon)$ 14. $label(q) = c$ 15. if $abs(N) < min\ Pts$ then continue 16. $S = S \cup N$

Points – это минимальное количество точек данных, требуемое внутри этого круга, чтобы эта точка данных была классифицирована как основная точка [18].

DBSCAN создает окружность радиусом эpsilon вокруг каждой точки данных и классифицирует их на основную точку, пограничную точку и шум. Точка данных является базовой точкой, если окружность вокруг нее содержит по крайней мере минимальное количество точек. Если количество точек меньше минимального значения, то оно классифицируется как пограничная точка, а если вокруг какой-либо точки данных в радиусе эpsilon нет других точек данных, то оно рассматривается как шум.

Описание алгоритма DBSCAN представлено в табл. 2.

Расширенный фильтр Калмана

В этой задаче нелинейность существует в пространстве измерений (модель движения системы линейна). Таким образом, область применения исследования сосредоточена в пространстве нелинейных измерений, а не в распределении шума, которое подразумевается гауссовым [19].

Система расширенного фильтра Калмана описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} X_t &= f_{t-1}(X_{t-1}, v_{t-1}) \\ z_t &= h_t(X_t, w_t), \end{aligned} \quad (1)$$

где f_{t-1} и h_t известные, возможно нелинейные, x_{t-1} вектор состояния, v_{t-1} – шум процесса, z_t – вектор измерения, и w_t – шум измерения.

Модель движения системы линейна и содержит описание модели постоянной скорости и модели постоянного ускорения. Расширенный фильтр Калмана работает согласно двум этапам [19]:

- предсказание:

$$\begin{aligned} X_t &= AX_{t-1} + Bu_{t-1} + v_{t-1} \\ S_t &= AS_{t-1}A^T + Q \end{aligned} \quad (2)$$

- коррекция:

$$\begin{aligned} K_t &= S_{t-1}H^T(HS_{t-1}H^T + R)^{-1} \\ X_{t+1} &= X_t + K_t(z_t - h_t(X_t)) \\ S_{t+1} &= (I - K_tH)S_t \end{aligned} \quad (3)$$

где $X_t = (x_t, y_t, \dot{x}_t, \dot{y}_t)^T$ является вектором состояния, x – вертикальное положение объекта от радара, y – горизонтальное положение от радара, z_t является вектор измерения состояния, u_{t-1} вектор управления и v_{t-1} это гауссов шум или внешние силы. A – матрица состояния, B – входная матрица, S – ковариационная матрица, H – матрица частных производных (матрица Якоби), Q – матрица шума процесса (движения), R – матрица шума измерения и K – коэффициент усиления фильтра Калмана.

Матрицы A, B, S, H, Q, R могут быть определены следующим образом.

Модель постоянной скорости (Constant Velocity Extended Kalman Filter (CVEKF))

Вектор состояния положения и скорости объекта, относительно автобуса, описывается следующим образом:

$$X_t = (x_t \quad y_t \quad \dot{x}_t \quad \dot{y}_t)^T. \quad (4)$$

И матрица состояния:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где T – время обнаружения объектов радаром между двумя состояниями $[x_{t-1}, x_t]$.

Предполагая, что переменные состояния независимы друг от друга, ковариационную матрицу можно определить следующим образом [20]:

$$S_t = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{y}}^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где σ_x^2, σ_y^2 являются дисперсиями положения и $\sigma_{\dot{x}}^2, \sigma_{\dot{y}}^2$ являются дисперсиями скорости.

Матрица шума движения Q может быть определена как [20]:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & \sigma_{x\dot{x}} & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & \sigma_{y\dot{y}} \\ \sigma_{x\dot{x}} & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y\dot{y}} & 0 & \sigma_{\dot{y}}^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

который может быть записан как [17]:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}T^2 & 0 & \frac{1}{2}T^3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}T^2 & 0 & \frac{1}{2}T^3 \\ \frac{1}{2}T^3 & 0 & T^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^3 & 0 & T^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Вектор измерения определяется таким образом:

$$z = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Модель измерения нелинейна, поэтому требуется вычислить матрицу частных производных (матрица Якоби), которая может быть вычислена следующим образом [21]:

$$H = \frac{dz}{dX} = \begin{bmatrix} \frac{dr}{dx} & \frac{dr}{dy} & \frac{dr}{dx} & \frac{dr}{dy} \\ \frac{d\theta}{dx} & \frac{d\theta}{dy} & \frac{d\theta}{dx} & \frac{d\theta}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ -\frac{\sin(\theta)}{r} & 0 & \frac{\cos(\theta)}{r} & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Матрица R , представляющая матрицу шума измерения, определяется следующим образом:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В результате все матрицы известны и можно всегда обновить вектор состояния в представленном уравнении, а также можно отслеживать позицию объектов:

$$\begin{aligned} X_{CVEKF} &= X_t(1) \\ Y_{CVEKF} &= X_t(2) \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, координаты объекта можно отслеживать с помощью модели постоянной скорости ($X_{CVEKF}, X_t(1)$), которая является первым и вторым компонентами вектора состояния ($X_t(1), X_t(2)$).

Модель постоянного ускорения (Constant Acceleration Extended Kalman Filter (CVEKF))

Вектор состояния описывается таким образом:

$$X_t = (x_t \quad y_t \quad \dot{x}_t \quad \dot{y}_t \quad \ddot{x}_t \quad \ddot{y}_t)^T \quad (13)$$

Матрица состояния:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T & 0 & \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где T – это время обнаружения между двумя состояниями $[x_{t-1}, x_t]$.

Предполагая, что переменные состояния независимы друг от друга, ковариационную матрицу можно определить следующим образом [20]:

$$S_t = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{y}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\ddot{x}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\ddot{y}}^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Матрица шума движения Q может быть определена как [20]:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & \sigma_{x\ddot{x}} & 0 & \sigma_{x\ddot{x}} & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & \sigma_{y\ddot{y}} & 0 & \sigma_{y\ddot{y}} \\ \sigma_{x\ddot{x}} & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & 0 & \sigma_{x\ddot{x}} & 0 \\ 0 & \sigma_{y\ddot{y}} & 0 & \sigma_{\dot{y}}^2 & 0 & \sigma_{y\ddot{y}} \\ \sigma_{x\ddot{x}} & 0 & \sigma_{x\ddot{x}} & 0 & \sigma_{\dot{x}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y\ddot{y}} & 0 & \sigma_{y\ddot{y}} & 0 & \sigma_{\dot{y}}^2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

Эта матрица записывается следующим образом:

$$Q = \begin{bmatrix} T^6 & 0 & T^5 & 0 & T^4 & 0 \\ 36 & 0 & 12 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & T^6 & 0 & T^5 & 0 & T^4 \\ 0 & 36 & 0 & 12 & 0 & 6 \\ T^5 & 0 & T^4 & 0 & T^3 & 0 \\ 12 & 0 & 12 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & T^5 & 0 & T^4 & 0 & T^3 \\ 0 & T^5 & 0 & T^4 & 0 & T^3 \\ T^4 & 12 & T^3 & 12 & T^2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T^2 & 0 \\ 6 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & T^4 & 0 & T^3 & 0 & T^2 \\ 0 & 6 & 0 & 2 & 4 & T^2 \\ 0 & 6 & 0 & 2 & 4 & T^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Условие срабатывания предупреждения

Система помощи при повороте предупреждает водителя о наличии объектов вокруг автобуса во время поворота. Рассмотренная критическая ситуация представлена на *рис. 1*. Предупреждение возникает в соответствии со следующим уравнением:

$$\text{Предупреждение} = \begin{cases} 1, ((\text{Speed_Bus} \& \text{Gear} \& X_position \& Y_position \& \text{Theta_turning}) = \text{True}) \\ 0, \text{else} \end{cases}, \quad (21)$$

где *Speed_Bus* – это условие срабатывания системы, относительно скорости автобуса (км/час), *Glear* – это условие активации с учетом направления движения, которое находится, исходя из положения коробки передач: если передача переключена на 1–6 (в механической коробке передач), то автобус движется вперед.

Вектор измерения определяется уравнением 6, которое требует вычисления матрицы частных производных (матрица Якоби) следующим образом [21]:

$$H = \frac{dz}{dX} = \begin{bmatrix} \frac{dr}{dx} & \frac{dr}{dy} & \frac{dr}{d\dot{x}} & \frac{dr}{d\dot{y}} & \frac{dr}{d\ddot{x}} & \frac{dr}{d\ddot{y}} \\ \frac{d\theta}{dx} & \frac{d\theta}{dy} & \frac{d\theta}{d\dot{x}} & \frac{d\theta}{d\dot{y}} & \frac{d\theta}{d\ddot{x}} & \frac{d\theta}{d\ddot{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & \frac{1}{r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Матрица R , представляющая матрицу шума измерения, определяется следующим образом:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

В результате все матрицы известны и имеется возможность всегда обновлять вектор состояния в представленном уравнении, а также отслеживать позицию объектов:

$$\begin{aligned} X_{CAEKF} &= X_t(1) \\ Y_{CAEKF} &= X_t(2) \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, координаты объекта можно отслеживать с помощью модели постоянного ускорения (X_{CAEKF} , Y_{CAEKF}), которая является первым и вторым значениями вектора состояния ($X_t(1)$, $X_t(2)$).

Для определения того, какая модель точнее оценивает и отслеживает положение объектов, необходимо сравнить две модели в сценарии, реализованном с помощью *Driving Scenario Designer* в *MATLAB*. Результаты моделирования представлены на *рис. 6*.

$X_position$ – это условие срабатывания по расстоянию до отслеживаемого объекта на оси X (м). $Y_position$ – это условие срабатывания по расстоянию до отслеживаемого объекта на оси Y (м). $Theta_turning$ – это условие активации системы в зависимости от угла поворота руля.

Предупреждение возникает, если выполняются все условия, такие как: скорость автобуса между 0–30 км/ч, коробка передач не находится в положении «Движение назад» (значение 1), объект находится в зоне предупреждения, в соответствии с продольными и боковыми границами (границы зоны предупреждения – 1.5–4 метра на Y и вдоль автобуса на X), и последним параметром является угол поворота руля, который должен быть более 90 градусов, считываемый с шины CAN.

Моделирование системы в Simulink

Сценарии для тестирования системы и оценки моделей на точность представляют из себя движение автобуса с объектами на дороге, которые созданы в математическом пакете MATLAB в Driving Scenario Designer [22], как показано на *рис. 5*.

Для каждого сценария проверялась работоспособность моделей по постоянной скорости и ускорению. По результатам тестов система предупреждала о возникновении опасной ситуации при повороте по мере приближения транспортного средства. На *рис. 6* представлены результаты, полученные при моделировании. Графики отображают расстояние до приближающегося автомобиля.

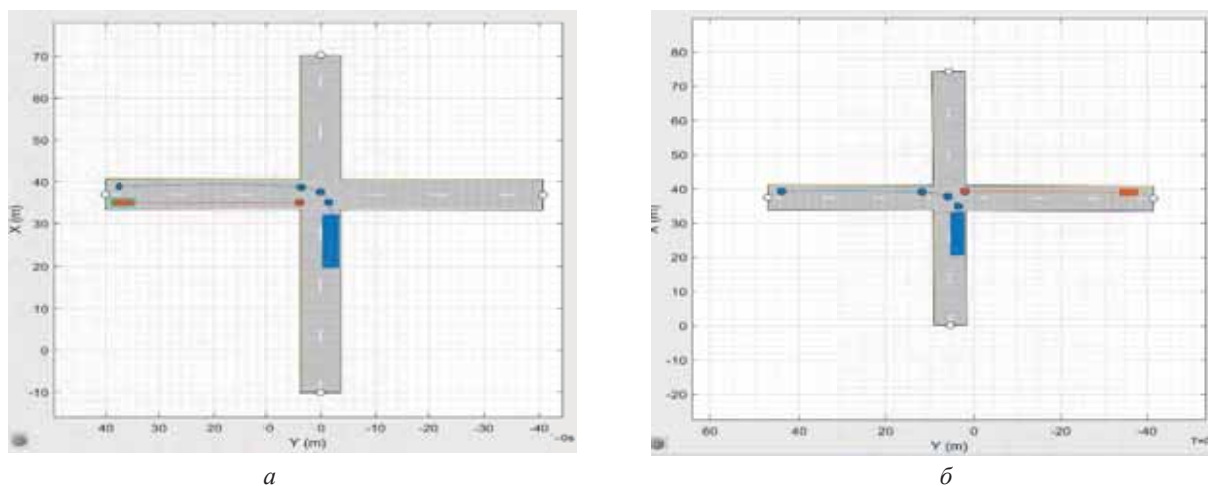


Рис. 5. Разработка сценариев с использованием конструктора сценариев вождения:

- а) сценарий, в котором автобус поворачивает налево, а слева приближается транспортное средство;
б) сценарий при повороте налево и приближении транспортного средства с правой стороны

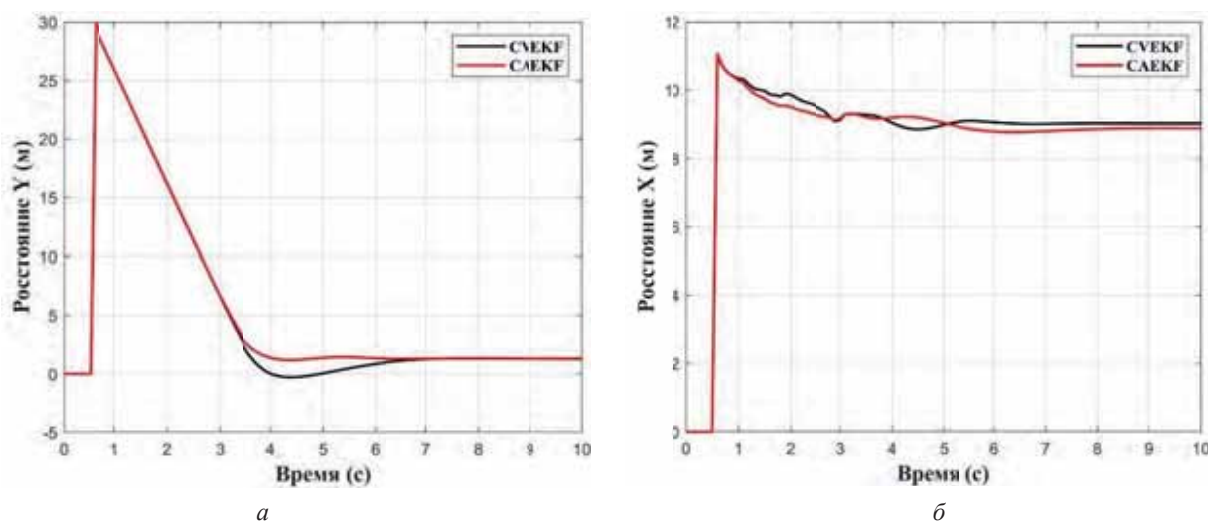


Рис. 6. Сравнение между моделями постоянной скорости и постоянного ускорения расширенного фильтра Калмана:
а) отслеживание положения на Y ; б) отслеживание положения на X

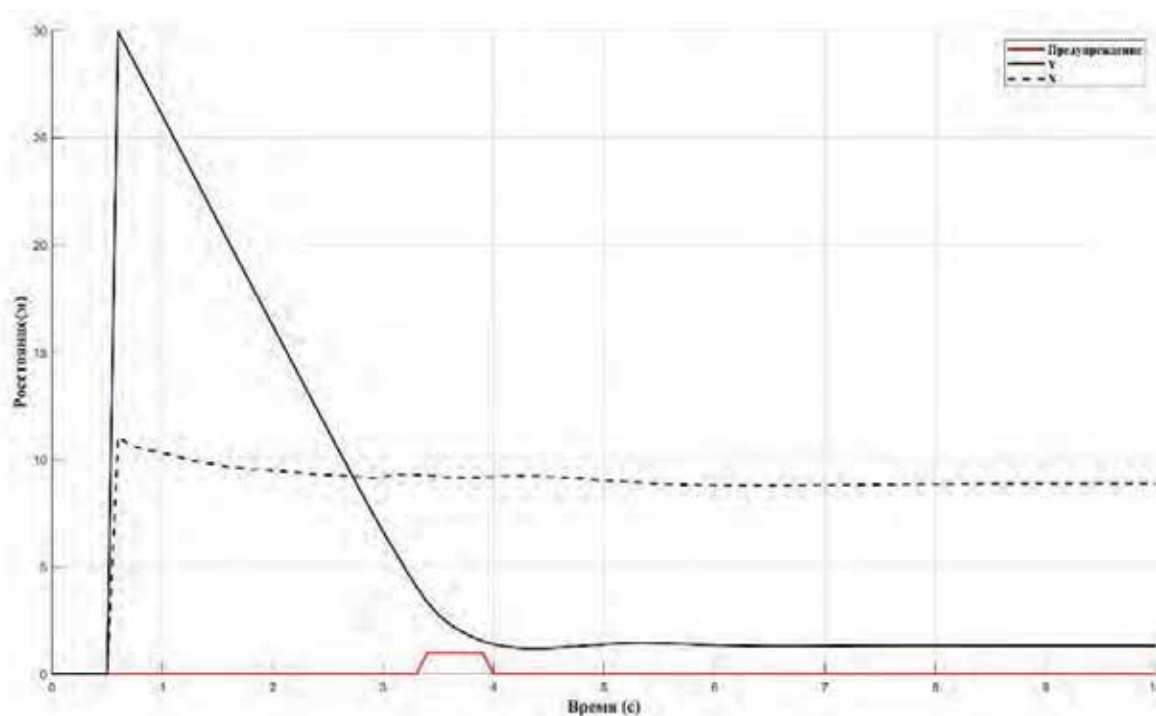


Рис. 7. Предупреждение возникает, если положение объекта меньше 4 метров от автобуса

Отчетливо видны этапы, когда радары обнаружили ТС и начали отслеживать его местоположение относительно автобуса.

Модель постоянного ускорения показывает лучшие результаты, чем модель постоянной скорости. Вероятность срабатывания системы повышается по мере приближения отслеживаемого объекта. На рис. 7 представлен момент срабатывания предупреждения в зависимости от положения объекта. В интервале 3–4 метров система оповестила водителя о потенциальной угрозе.

Обсуждение результатов

Алгоритм DBSCAN показывает объекты как кластеры, и затем отслеживает расстояние до объекта по ближайшей точке кластера. Положение и скорость ближайшей точки кластера являются вводными данными для фильтра Калмана. Расширенный фильтр Калмана используется из-за нелинейности в измерениях. Этот фильтр был использован с помощью двух моделей: постоянной скорости и постоянного ускорения. Модель постоянного ускорения при тестировании показала более точные результаты, с учетом того, что отслеживаемое транспортное средство едет с постоянным ускорением для интервала времени детекции радара. Также модель постоянного ускорения, помимо точности, не является труднореализуемой.

Заключение

В данной работе спроектирована и смоделирована система помощи при повороте. Предложена новая структура системы мониторинга с выделением системных требований и компонентов. Система отвечает за обнаружение всех объектов и препятствий на дороге во время поворота, отслеживание их положения и предупреждение водителя о возможном столкновении. Предлагаемая система моделируется в среде Simulink, с возможностью разработки сценариев для проведения верификации с использованием конструктора сценариев вождения. Наконец, сравнительная модели постоянной скорости и постоянного ускорения для расширенного фильтра Калмана, модель постоянного ускорения дала более точные результаты для определения объекта при повороте.

Библиографический список

1. Gutiérrez-Moreno R., Barea R., López-Guillén E., Araluce J., & Bergasa L.M. Reinforcement learning-based autonomous driving at intersections in CARLA simulator//Sensors. 2022. Vol. 22, № 21, P. 8373.
2. Scanlon John Michael, Sherony Rini, Gabler Hampton Clay. Earliest sensor detection opportunity for left turn across path opposite direction crashes// IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2017. Vol. 2, № 1, P. 62–70.

3. Winner Hermann, Stephan Hakuli, Felix Lotz and Christina Singer, eds. Handbook of driver assistance systems // Amsterdam, the Netherlands Springer International Publishing, 2014.
4. Domhof Joris, Julian FP Kooij and Dariu M. Gavrilu. An extrinsic calibration tool for radar, camera and lidar // In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE. 2019. P. 8107–8113.
5. Xu Rui; Wunsch Donald. Survey of clustering algorithms // IEEE Transactions on neural networks, 2005, Vol. 16, № 3, P. 645–678.
6. Q Liang. Radar Sensor Wireless Channel Modeling in Foliage Environment: UWB versus Narrowband [J] // IEEE Sensors Journal, 2011, Vol. 11, № 6, P. 1448–1457.
7. Liu Yanan, et al. Evaluation of nonlinear filtering for radar data tracking // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, Vol.1, P. 1–9.
8. Chen Yuan-Lin, Shen Kun-Yuan, Wang Shun-Chung. Forward collision warning system considering both time-to-collision and safety braking distance// In: 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2013. P. 972–977.
9. Береснев Павел Олегович и др. Разработка системы контроля слепых зон для коммерческих транспортных средств // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2021, Vol.3, с. 68–80.
10. Порубов Дмитрий Михайлович и др. Разработка системы контроля полосы движения на основе технического зрения // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2020, Vol. 4, с. 119–126.
11. Попов А.И. и др. Система автоматического торможения автомобиля. Адаптация штатной тормозной системы автомобиля ГАЗ-32213 для работы в составе СПСА// Журнал автомобильных инженеров, 2011, Vol. 6, с. 28–31.
12. Алхелу Мухаммед и др. Адаптивное управление компромиссом между управляемостью и комфортом в модели типа «Четверть автомобиля» // Проблемы управления, 2022, Vol. 2, с. 36–48.
13. Алхелу Мухаммед и др. Управление компромиссом между управляемостью и комфортом системы подвески типа «Четверть автомобиля» с использованием активного управления подавлением помех и уравнения Вышнеградского// Мехатроника, автоматизация, управление, 2022, Vol. 23 с. 367–375.
14. Muhammed Alhelou, Yazan Wassouf, Alexander Gavrilov. Linear-control vs. ADRC for automatic management of the handling-comfort contradiction of a quarter-car system. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2022, Vol. 29. № 2, P. 145–162.
15. Илюхин Ю.В., Топорин А.А. Обзор решений в области распределения задач между коллаборативным роботом и человеком // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2022. – № 3(62). – С. 58–62. – EDN TWBFNW.
16. П.В. Панфилов, В.В. Морозов. Повышение точности твердотельных лазерных дальномеров путем первичной обработки данных // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2022. – № 2(61). – С. 56–60. – EDN REYLUS.
17. А.В. Денисов, Е.Е. Усина, Р.Н. Яковлев и др. Алгоритмы построения сетей радиомаяков с ячеистой топологией для локализации робототехнических систем в сельском хозяйстве // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2019. – № 3(50). – С. 57–65. – EDN XHGWXO.
18. Shen Jianbing, et al. Real-time superpixel segmentation by DBSCAN clustering algorithm // IEEE transactions on image processing, 2016, Vol. 25, № 12, P. 5933–5942.
19. Floudas Nikolaos, Polychronopoulos Aris; Amditis Angelos. A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms// In: 2005 7th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2005. P. 8.
20. Kim Youngjoo and Hyochoong Bang. Introduction to Kalman filter and its applications // Introduction and Implementations of the Kalman Filter, 2018, vol. 1, P. 1–16.
21. Fujii Keisuke. Extended Kalman filter. Reference Manual, 2013, P. 14–22.
22. Math Works official site. Driving Scenario Designer.URL: <https://www.mathworks.com/help/driving/ref/drivingsceniodesigner-app.html> [Дата обращения: 25.12.2022].

References

1. Gutiérrez-Moreno, R., Barea, R., López-Guillén, E., Araluce, J., & Bergasa, L.M. Reinforcement learning-based autonomous driving at intersections in CARLA simulator//Sensors. 2022. Vol. 22, №. 21, pp. 8373.
2. SCANLON, John Michael; SHERONY, Rini; GABLER, Hampton Clay. Earliest sensor detection opportunity for left turn across path opposite direction crashes// IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, Vol. 2 № 1. pp. 62–70.
3. Winner, Hermann, Stephan Hakuli, Felix Lotz, and Christina Singer, eds. Handbook of driver assistance systems // Amsterdam, the Netherlands Springer International Publishing, 2014.
4. Domhof, Joris, Julian FP Kooij, and Dariu M. Gavrilu. An extrinsic calibration tool for radar, camera and lidar // In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE. 2019. pp. 8107–8113.

5. XU, Rui; WUNSCH, Donald. Survey of clustering algorithms // IEEE Transactions on neural networks, 2005, Vol. 16, № 3. pp. 645–678.
6. Q Liang. Radar Sensor Wireless Channel Modeling in Foliage Environment: UWB versus Narrowband [J] // IEEE Sensors Journal, 2011, Vol. 11, № 6. pp. 1448–1457.
7. LIU, Yanan, et al. Evaluation of nonlinear filtering for radar data tracking // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, Vol.1, pp. 1–9.
8. CHEN, Yuan-Lin; SHEN, Kun-Yuan; WANG, Shun-Chung. Forward collision warning system considering both time-to-collision and safety braking distance // In: 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2013. pp. 972–977.
9. BERESNEV, Pavel Olegovich, et al. DEVELOPMENT OF A BLIND SPOT CONTROL SYSTEM FOR COMMERCIAL VEHICLES // Proceedings of NSTU im. RE Alekseeva, 2021, Vol.3, p. 68–80.
10. PORUBOV, Dmitry Mikhailovich, et al. Development of a lane control system based on technical vision // Proceedings of NSTU im. RE Alekseeva, 2020, Vol. 4, p. 119–126.
11. POPOV, A. I., et al. Automatic braking system of the car. Adaptation of the standard braking system of the GAZ-32213 car to work as part of the SPSA // Journal of Automotive Engineers, 2011, Vol. 6, p. 28–31.
12. ALKHELU, Mohammed, et al. ADAPTIVE MANAGEMENT OF THE COMPROMISE BETWEEN CONTROLLABILITY AND COMFORT IN THE «QUARTER CAR» TYPE MODEL // Management Problems, 2022, Vol. 2, p. 36–48.
13. ALKHELU, Mohammed, et al. Managing the compromise between controllability and comfort of the suspension system of the quarter car type» using active interference suppression control and the Vyshnegradsky equation // Mechatronics, Automation, Control, 2022, Vol. 23 p. 367–375.
14. MUHAMMED, Alhelou; YAZAN, Wassouf; I, Alexander Gavrilov. Linear-control vs. ADRC for automatic management of the handling-comfort contradiction of a quarter-car system. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2022, Vol. 29, № 2. p. 145–162.
15. Ilyukhin, Yu.V., Toporin A.A. Overview of solutions in the field of distribution of tasks between a collaborative robot and a human // Vestnik MSUT “STANKIN”. – 2022. – № 3(62). – pp. 58–62. – EDN TWBFNW.
16. P.V. Panfilov, V.V. Morozov. Improving the accuracy of solid-state laser rangefinders by primary data processing // Vestnik MSUT “STANKIN”. – 2022. – № 2(61). – pp. 56–60. – EDN REYLUS.
17. A.V. Denisov, E.E. Musina, R.N. Yakovlev [et al.] Algorithms for building networks of beacons with cellular topology for localization of robotic systems in agriculture // Vestnik MSUT “STANKIN”. – 2019. – № 3(50). – pp. 57–65. – EDN XHGWXO.
18. SHEN, Jianbing, et al. Real-time superpixel segmentation by DBSCAN clustering algorithm // IEEE transactions on image processing, 2016, Vol. 25, № 12. pp. 5933–5942.
19. FLOUDAS, Nikolaos; POLYCHRONOPOULOS, Aris; AMDITIS, Angelos. A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms // In: 2005 7th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2005. pp. 8.
20. Kim, Youngjoo, and Hyochoong Bang. Introduction to Kalman filter and its applications // Introduction and Implementations of the Kalman Filter, 2018, vol. 1, pp. 1–16.
21. FUJII, Keisuke. Extended kalman filter. Reference Manual, 2013, pp. 14–22.
22. Math Works official site. Driving Scenario Designer. URL: <https://www.mathworks.com/help/driving/ref/drivingscenariodesigner-app.html> [Accessed: 12/25/2022].

Вассуф Язан – аспирант кафедры СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана; главный специалист по программированию БТС, служба автономных автомобилей, ООО «ИЦ «КАМАЗ»

Vassufya@student.bmstu.ru

Тарасенко Андрей Владимирович – магистр кафедры № 304 «Информатика и вычислительная техника», МАИ; инженер-программист 3-й категории, служба автономных автомобилей, ООО «ИЦ «КАМАЗ»

TarasenkoAV@kamaz.ru

Коржуков Максим Валентинович – руководитель группы программного обеспечения, служба автономных автомобилей, ООО «ИЦ «КАМАЗ»

KorzhukovMV@kamaz.ru

Серебряный Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой СМ7 «Робототехнические системы и мехатроника», факультет «Специальное машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана

vsereb@bmstu.ru

Wassouf Yazan – postgraduate student at the department of SM7 “Robotic Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University; Chief Programming Specialist of BTS, Department of autonomous vehicles, LLC “IC “KAMAZ”

Vassufya@student.bmstu.ru

Tarassenko Andrey Vladimirovich – master degree student at the department № 304 «Informatics and Computer Engineering», MAI; Software engineer of the 3rd category, Department of autonomous vehicles, LLC “IC “KAMAZ”

TarassenkoAV@kamaz.ru

Korzhukov Maxim Valentinovich – Head of the software group, Department of autonomous vehicles, LLC “IC “KAMAZ”

KorzhukovMV@kamaz.ru

Serebrenny Vladimir Valerievich – candidate Sc. of Engineering, docent, Head of the department of SM7 “Robotic Systems and Mechatronics”, faculty of “Special Engineering”, Bauman Moscow State Technical University

vsereb@bmstu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.9.08

КОРРЕКЦИЯ ОБЪЁМНОЙ ТОЧНОСТИ ПОРТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА

Я.И. Пимушкин, М.М. Стебулянин
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Рассматривается задача коррекции объёмной точности устройств с портальной кинематикой в косоугольной системе координат со смещённым центром, описывающей физическую систему реализуемого движения станка / измерительной машины в условиях систематических погрешностей.

Ключевые слова: многокоординатные системы, лазерные измерения, объёмная точность, лазерный трекер, портальная система.

CORRECTION OF VOLUMETRIC ACCURACY OF THE PORTAL SYSTEM USING A LASER TRACKER

Ya.I. Pimushkin, M.M. Stebulyanin
MSUT "STANKIN"

Abstract

The article considers the problem of volumetric accuracy correction of devices with portal kinematics in an oblique off-center coordinate system describing the physical axis system of the realized machine/measurement machine motion under conditions of systematic errors.

Keywords: multi-axis systems, laser measurements, volumetric accuracy, laser tracker, gantry system.

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 Mc Keown P.A., Loxham J. [1], а в отечественных публикациях данное понятие появляется

в работах Серкова Н.А. [2]. Количественно объёмная точность характеризуется объёмной погрешностью (ОП), которая для каждой точки рабочего пространства представляет собой вектор, направленный от заданного (номинального) положения выбранного полюса машины или станка к его действительному положению.

В последнее десятилетие проблематика повышения ОТ получила широкое распространение [3–10].

Объёмные погрешности

Определение объёмной точности возможно на основании косвенных измерений пространственных функций, описывающих объёмные погрешности позиционирования системы с заданной кинематической структурой. Например, для распространённой в современных станках, промышленных роботах

и измерительных машинах портальной кинематики полная сводка таких погрешностей приведена в *Таблице* [1]. При обозначении угловых погрешностей используется греческая буква ε , линейных погрешностей – δ .

Измерение и использование 21 пространственной функции с целью построения алгоритмов коррекции реального движения механической системы относительного другого, рассматриваемого в условиях идеальной координатной кинематики, представляет собой чрезвычайно трудоемкую и сложную задачу как в части

измерительной, так и вычислительной проблематики.

Поэтому практический интерес могут представлять «первые приближения» решения задачи коррекции объемной точности трех-координатных систем портальной кинематики в составе современных станков, роботов и измерительных машин, основанные на некоторых условиях упрощения *Таблицы*. При этом необходима экспериментальная проверка каждого такого решения, как инструмент его обоснования и возможного совершенствования.

Таблица

Параметрические погрешности 3-координатных станков

№ п/п	Наименование		Обозначение
	русское	международное	
1	Погрешность позиционирования вдоль оси OX	scale error of X	$\delta_{x^x}(X)$
2	Отклонение от прямолинейности оси OX в направлении оси OY	Y straightness of X	$\delta_{y^x}(X)$
3	Отклонение от прямолинейности оси OX в направлении оси OZ	Z straightness of X	$\delta_{z^x}(X)$
4	крен оси OX	roll error of X	$\varepsilon_{x^x}(X)$
5	тангаж оси OX	pitch error of X	$\varepsilon_{y^x}(X)$
6	рыскание оси OX	yaw error of X	$\varepsilon_{z^x}(X)$
7	Погрешность позиционирования вдоль оси OY	scale error of Y	$\delta_{y^y}(Y)$
8	Отклонение от прямолинейности оси OY в направлении оси OX	X straightness of Y	$\delta_{x^y}(Y)$
9	Отклонение от прямолинейности оси OY в направлении оси OZ	Z straightness of Y	$\delta_{z^y}(Y)$
10	крен оси OY	roll error of Y	$\varepsilon_{y^y}(Y)$
11	тангаж оси OY	pitch error of Y	$\varepsilon_{x^y}(Y)$
12	рыскание оси OY	yaw error of Y	$\varepsilon_{z^y}(Y)$
13	Погрешность позиционирования вдоль оси OZ	scale error of Z	$\delta_{z^z}(Z)$
14	Отклонение от прямолинейности оси OZ в направлении оси OX	X straightness of Z	$\delta_{x^z}(Z)$
15	Отклонение от прямолинейности оси OZ в направлении оси OY	Y straightness of Z	$\delta_{y^z}(Z)$
16	крен оси OZ	roll error of Z	$\varepsilon_{z^z}(Z)$
17	тангаж оси OZ	pitch error of Z	$\varepsilon_{x^z}(Z)$
18	рыскание оси OZ	yaw error of Z	$\varepsilon_{y^z}(Z)$
19	Отклонение от взаимной перпендикулярности осей OX и OY	Y squareness of X	α_{xy}
20	Отклонение от взаимной перпендикулярности осей OY и OZ	Z squareness of Y	α_{yz}
21	Отклонение от взаимной перпендикулярности осей OZ и OX	Z squareness of X	α_{zx}

Объем упрощений, принимаемых в данной работе, определяется следующим допущением: *линейное перемещение рабочего органа осуществляется в реальной системе осей приводов станка, рассматриваемой как неформализованная косоугольная система прямых осей, смещенная относительно системы измерений, в условиях только систематических ошибок.*

Коррекция объёмной точности мехатронной системы с портальной кинематикой

Для эффективной коррекции погрешностей мехатронной системы с портальной кинематикой необходимо иметь картину их распределения в рабочем пространстве (error mapping). Сложность заключается в том, что на сегодня не существует средств, обеспечивающих непосредственное измерение координат точки в 3-мерном пространстве с достаточной точностью.

Ближе всего к такому режиму измерений находятся так называемые лазерные трекеры (laser tracker), с успехом применяемые в различных операциях, связанных с контролем точности позиционирования деталей и инструментов в пространстве путём прямых измерений, при которых лазерный трекер имеет свою систему координат, принимаемую за идеальную.

Лазер-трекеры являются универсальными высокоскоростными координатно-измерительными

машинами, позволяющими проводить сложные измерительные манипуляции с большой точностью. Диапазон измерительных дистанций современных лазер-трекеров достигает 160 м. Предел допускаемой абсолютной погрешности равен $\pm(10 + 5L)$ мкм, где L – дистанция от системы до отражателя в метрах.

Принцип действия лазер-трекера заключается в измерении им горизонтального H_z и вертикального V углов направления луча на отражатель, с одновременным измерением дистанции D , так, как это показано на *рис. 1*.

Уравнения определения координат точки отражателя (x_0, y_0, z_0) лазерного трекера, основанные на замерах горизонтального (H_z) и вертикального (V) углов и дистанции (D), имеют вид:

$$\begin{aligned} x_0 &= D \cdot \sin V \cdot \cos H_z; \\ y_0 &= D \cdot \sin V \cdot \sin H_z; \quad z_0 = D \cdot \cos V \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим применение лазерного трекера для построения программной модели коррекции объёмной точности мехатронной системы с портальной кинематикой. Обратимся к *рис. 2*.

Систему координат лазерного трекера (систему измерительных осей), рассматриваемую как идеальную, обозначим через XYZ с началом в точке O . Реальную систему осей приводов (физических осей) станка обозначим через ABC с началом в точке O_1 , смещенной вектором \vec{r}_1 . Система $ABC O_1$ рассматривается как косоугольная система прямых осей.

Оси O_1A и OX , O_1B и OY , O_1C и OZ назовем соответствующими. При этом будем полагать, что угол какой-либо из осей O_1A, B, C со своей соответствующей осью много меньше углов с двумя другими осями системы $OXYZ$.

Рассмотрим перемещение по физической оси O_1A сначала в точку 1, затем в точку 2 (*рис. 2*).

Для того, чтобы понять, как происходит изменение в измерительной системе координат точки при движении по физической оси O_1A , запишем уравнения прямой.

$$\frac{x - x_1}{\Delta x} = \frac{y - y_{x_1}}{\Delta y_x} = \frac{z - z_{x_1}}{\Delta z_x} \quad (2)$$

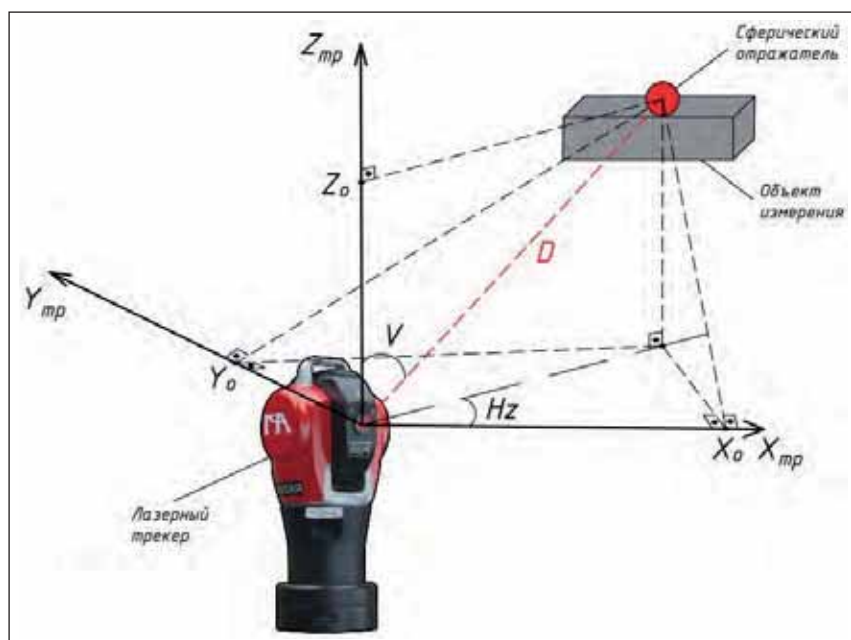


Рис. 1. Принципиальная схема определения координат отражателя в пространстве

В силу (1) полагаем известными Δx , Δy_x , Δz_x , при этом имеем: $\Delta x \gg \Delta y_x$, $\Delta x \gg \Delta z_x$. По уравнению (2) можно записать следующие равенства, полагая $x_0 = x_{01}$,

$$(x_{01} - x_1) \frac{\Delta y_x}{\Delta x} = y_{01} - y_{x1} \quad (3a)$$

$$(x_{01} - x_1) \frac{\Delta z_x}{\Delta x} = z_{01} - z_{x1} \quad (3б)$$

Допустим, что перемещение q_{1T} из точки 1 в точку 2 известно с достаточной точностью из показания штатного датчика положения оси O_1A , запишем уравнение

$$(x_{01} - x_1)^2 + (y_{01} - y_{x1})^2 + (z_{01} - z_{x1})^2 = q_{1T}^2$$

Используя равенства (3а, б), это уравнение можно переписать в виде

$$(x_{01} - x_1)^2 \left[1 + \left(\frac{\Delta y_x}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta z_x}{\Delta x} \right)^2 \right] = q_{1T}^2 \quad (4)$$

Найдем направляющие косинусы оси O_1A в измерительной системе координат $OXYZ$:

$$\cos(0_1A, x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y_x^2 + \Delta z_x^2}} = \frac{\Delta x}{\Delta_1} = \text{const} \quad (5a)$$

$$\cos(0_1A, y) = \frac{\Delta y_x}{\Delta_1} = \text{const} \quad (5б)$$

$$\cos(0_1A, z) = \frac{\Delta z_x}{\Delta_1} = \text{const} \quad (5в)$$

Теперь можно найти величину x_{01} по формуле:

$$x_{01} = x_1 \pm \frac{q_{1T}}{\sqrt{1 + \alpha_{yx}^2 + \alpha_{zx}^2}},$$

где $\alpha_{yx} = \frac{\Delta y_x}{\Delta x}$, $\alpha_{zx} = \frac{\Delta z_x}{\Delta x}$.

Будем использовать знак «минус», потому что движение осуществляется в положительном направлении, и при этом точка 2 дальше точки 1. Аналогично запишем выражения для y_{01} , z_{01} :

$$y_{01} = y_{x1} - \frac{q_{1T} \alpha_{yx}}{\sqrt{1 + \alpha_{yx}^2 + \alpha_{zx}^2}}$$

$$z_{01} = z_{x1} - \frac{q_{1T} \alpha_{zx}}{\sqrt{1 + \alpha_{yx}^2 + \alpha_{zx}^2}}$$

Отсюда получаем вектор \vec{r}_{01} , определяющий в измерительной системе точку начала физических осей:

$$\vec{r}_{01} = \begin{pmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{pmatrix}$$

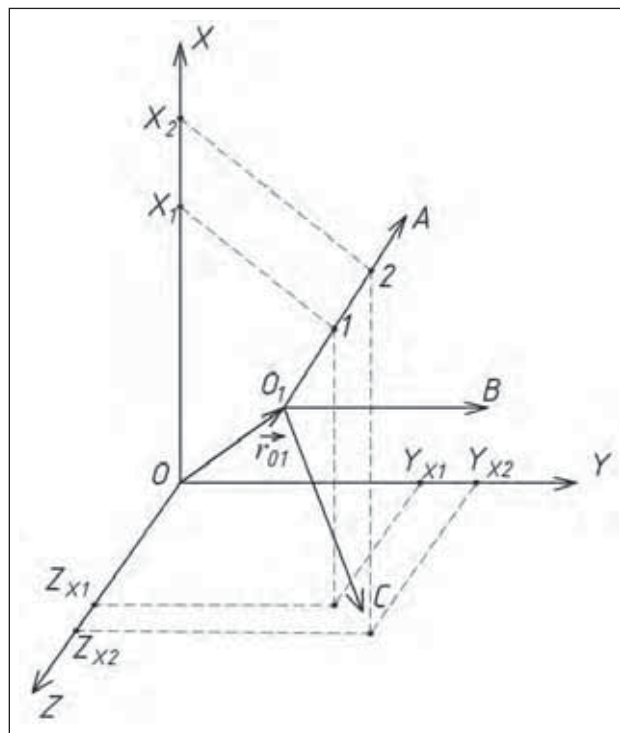


Рис. 2. Системы измерительных и физических осей станка

При произвольном перемещении (с учётом знака) q_1 , по оси O_1A получаем значение радиус-вектора изображающей точки в виде

$$\vec{r}_{\text{var}}(q_1) = \vec{r}_{01} + q_1 \tilde{C}_1; \quad \tilde{C}_1 = \begin{bmatrix} \cos(0_1A, Ox) \\ \cos(0_1A, Oy) \\ \cos(0_1A, Oz) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} \\ \tilde{C}_{12} \\ \tilde{C}_{13} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Аналогично будем рассуждать при последующем перемещении по оси O_1B , полагая, что результат движения по оси O_1A уже найден и выражается равенством (6).

Для этого найдем направляющие косинусы оси O_1B в измерительной системе:

$$\cos(0_1B, x) = \frac{\Delta xy}{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta x_y^2 + \Delta z_y^2}} = \frac{\Delta xy}{\Delta_2}$$

$$\cos(0_1B, y) = \frac{\Delta y}{\Delta_2}$$

$$\cos(0_1B, z) = \frac{\Delta zy}{\Delta_2}$$

$$\Delta y \gg \Delta xy, \Delta x \gg \Delta zy$$

Пусть $q_2 > 0$ – произвольное известное перемещение по оси O_1B .

Тогда на основе принципа последовательного движения, который гласит, что в позиционной системе,

к которой относится порталная кинематика, конечное положение определяется только набором обобщенных координат, но не порядком их изменения, можем записать уравнение

$$\bar{r}_{\text{var}}(q_1, q_2) = \bar{r}_{\text{var}}(q_1) + q_2 \tilde{C}_2 = \bar{r}_{01} + q_1 \tilde{C}_1 + q_2 \tilde{C}_2, \quad (7)$$

$$\text{где } \tilde{C}_2 = \begin{bmatrix} \cos(0_1 B, 0x) \\ \cos(0_1 B, 0y) \\ \cos(0_1 B, 0z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{21} \\ \tilde{C}_{22} \\ \tilde{C}_{23} \end{bmatrix} = \text{const}$$

Далее рассмотрим перемещение $q_3 > 0$ по физической оси $O_1 C$, найдя её направляющие косинусы в измерительной системе:

$$\cos(0_1 C, x) = \frac{\Delta x z}{\sqrt{\Delta_z^2 + \Delta_{xz}^2 + \Delta_{yz}^2}} = \frac{\Delta x z}{\Delta_3}$$

$$\cos(0_1 C, y) = \frac{\Delta y z}{\Delta_3}$$

$$\cos(0_1 C, z) = \frac{\Delta z}{\Delta_3}$$

$$\Delta z \gg \Delta x z, \Delta x \gg \Delta y z$$

Образуем вектор $\tilde{C}_3 = \begin{bmatrix} \cos(0_1 C, 0x) \\ \cos(0_1 C, 0y) \\ \cos(0_1 C, 0z) \end{bmatrix}$ и запишем конечный результат:

$$\Delta \bar{r} = \bar{r}_{\text{var}}(q_1, q_2, q_3) - \bar{r}_{01} = q_1 \tilde{C}_1 + q_2 \tilde{C}_2 + q_3 \tilde{C}_3,$$

или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} \tilde{C}_{21} \tilde{C}_{31} \\ \tilde{C}_{12} \tilde{C}_{22} \tilde{C}_{32} \\ \tilde{C}_{13} \tilde{C}_{23} \tilde{C}_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = G \cdot \bar{q} = \Delta \bar{r}$$

Отсюда находим обобщенные координаты по физическим осям при движении в целевую точку \bar{r} :

$$q = G^{-1} \Delta r = G^{-1} (r - r_{01}) \quad (8)$$

Матрица G и вектор \bar{r}_{01} являются калибровочными матрицей и вектором.

Таким образом, вектор линейной объёмной погрешности при движении в целевую точку \bar{r} в условиях, не учитываемых аналитически, т.е. пренебрегаемых, смещения и поворота физической системы относительно измерительной, когда вектор \bar{q} обобщенных координат, физически реализуемых приводами, отождествляется с целевым вектором \bar{r} , составит:

$$\vec{\delta}(\bar{q} = \bar{r}) = \bar{r} - G\bar{r} - \bar{r}_{01} = (E - G)\bar{r} - \bar{r}_{01} \quad (9)$$

При учете коррекции физического движения на основе формулы (8), вектор линейной объёмной погрешности станет нулевым:

$$\vec{\delta}(\bar{q}) = \bar{r} - G\bar{q} - \bar{r}_{01} = \bar{r} - GG^{-1}(\bar{r} - \bar{r}_{01}) - \bar{r}_{01} = \vec{0} \quad (10)$$

Разница $\vec{\delta}(\bar{q} = \bar{r}) - \vec{\delta}(\bar{q}) = \vec{\delta}(\bar{q} = \bar{r})$ называется приобретаемой точностью системы. Эта величина, вычисляемая по формуле (9), фактически равна повышению точности позиционирования порталной системы при учете калибруемых смещения и поворота системы физических осей относительно измерительной системы.

Заключение

Практический интерес представляют решения задачи коррекции объёмной точности систем порталной кинематики в составе современных станков, промышленных роботов и измерительных машин, основанные на некоторых условиях упрощения множества функций объёмных погрешностей.

При упрощениях, принятых в данной работе, для реализации точного движения, т.е. движения при учете неформализованных (неизвестных априорно) смещения и поворота косоугольной системы прямых физических осей относительно декартовой измерительной системы, воздействия на приводы движения должны быть сформированы на основе формулы (8), выражающей решение обратной задачи порталной кинематики в условиях коррекции объёмной погрешности позиционирования. При этом приобретаемая точность позиционирования вычисляется с помощью калибровочных матрицы G и вектора \bar{r}_{01} по формуле (9).

Библиографический список

1. McKeown P.A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines// Ann. CIRP. 1973. № 22(1).
2. Серков Н.А. Методы и средства измерений объёмной точности многокоординатных станков с ЧПУ // Вестник научно-технического развития. 2012. № 3 (55). С. 26–46.
3. Schwenke H., e. a. Geometric error management and compensation of machines – an update // Ann. CIRP. 2008. № 57. P. 660–675.
4. Schwenke H., Franke M., Hannaford J. Error mapping of CMMs and Machine tools by a single tracking interferometer // Ann. CIRP. 2005. № 54(1). P. 475–478.

5. 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. C. 122–139.

6. 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.

7. 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.

8. 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. – P. 243–248.

9. 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. – P. 2235–2248.

10. 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. P. 2534–2550. DOI: 10.1177/0954406214562633.

References

1. Mc Keown P.A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines // *Ann. CIRP*. 1973. № 22(1).

2. Serkov N.A. Methods and means of measuring volumetric accuracy of multi-coordinate CNC machines // *Bulletin of scientific and technical development*. 2012. № 3 (55). pp. 26–46.

3. Schwenke H., e. a. Geometric error management and compensation of machines – an update // *Ann. CIRP*. 2008. № 57. P. 660–675.

4. Schwenke H., Franke M., Hannaford J. Error mapping of CMMs and Machine tools by a single tracking interferometer // *Ann. CIRP*. 2005. № 54(1). P. 475–478.

5. 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. C. 122–139.

6. 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.

7. 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.

8. 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. – P. 243–248.

9. 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. – P. 2235–2248.

10. 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. P. 2534–2550. DOI: 10.1177/0954406214562633.

Пимушкин Ярослав Игоревич – старший преподаватель кафедры измерительных информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

yaroslav-pimushkin@yandex.ru

Стебулянин Михаил Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

mmsteb@rambler.ru

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

yaroslav-pimushkin@yandex.ru

Stebulyanin Mikhail Mihailovich – D.Sc. of Engineering, docent, professor at the sub-department of «High effective machining technologies», MSUT “STANKIN”

mmsteb@rambler.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.865.8.001

РАЗБИЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ МЕЖДУ ЕГО КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

О.Д. Егоров
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Рассмотрена методика разбиения заданной погрешности выходного звена мехатронного модуля степени подвижности исполнительного устройства робота между его конструктивными элементами.

Ключевые слова: мехатронный модуль, степень подвижности, робот, погрешность, элемент.

SPLITTING THE ERROR OF A MECHATRONIC MODULE BETWEEN IT'S STRUCTURAL ELEMENTS

O.D. Egorov
MSUT "STANKIN"

Abstract

The method of splitting the specified error of the output link of the mechatronic module of the motion freedom of the robot's actuating device between its structural elements is considered.

Keywords: mechatronic module, motion freedom, robot, error, element.

Введение

Создание автоматизированных производств, роботизированных мехатронных систем и комплексов возможно благодаря применению многофункциональных, автоматически действующих, перепрограммируемых машин, имитирующих действия человека – роботов. Внимание учёных, конструкторов, инженеров сосредоточено на создании роботов, отвечающих современным требованиям качества, надёжности и безопасности.

Основным показателем качества работы робота является точность, которую оценивают погрешностью позиционирования – отклонением характеристической рабочей точки рабочего органа робота от значения, задаваемого управляющей программой [1, 2].

В зависимости от назначения робота, в одних случаях требуется только точное позиционирование, т.е. точное приведение транспортируемого объекта в заданное положение в пространстве, в других необходимо обеспечить точное отслеживание заданной траектории или точное выполнение законов изменения во времени координат объекта.

Решению проблемы повышения точности роботов способствует использование высокоэффективных технологий изготовления, современных методов расчётов и конструирования как отдельных элементов, так и всего робота в целом.

Современных роботов строят на мехатронных принципах и технологиях, а важнейшими составляющими роботов являются мехатронные модули (ММ). Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное изделие, построенное с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу и предназначенное для реализации требуемого управляемого функционального движения его выходного звена [3].

Высокая точность движения выходного звена, надёжность, долговечность, минимальные массогабаритные показатели и минимальная сложность являются противоречивыми требованиями, которые должен учитывать конструктор при создании нового ММ.

Основная часть

Рассмотрим мехатронный модуль-привод (рисунки), состоящий из двигателя 1 и механического двухступенчатого коническо-цилиндрического преобразователя движения (МКЦПД), включающего в себя зубчатый конический преобразователь движения (ЗКПД), состоящий из зубчатых колес 3 и 4 с числом зубьев z_3 и z_4 , вала 5, зубчатого цилиндрического преобразователя движения (ЦПД) с зубчатыми колесами 6 и 7, числом зубьев z_6 и z_7 и выходного вала 8.

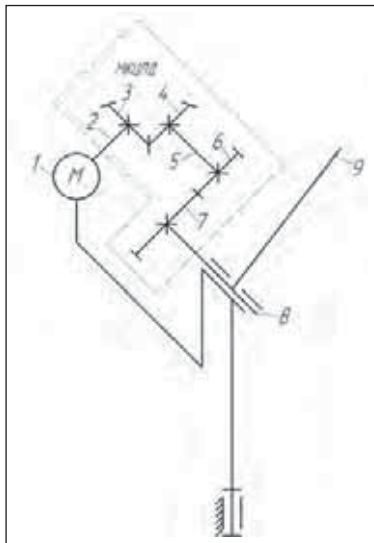


Рисунок. Механический коническо-цилиндрический модуль-привод

Цель работы – разработка методики разбиения заданной погрешности мехатронного модуля степени подвижности исполнительного устройства (ИУ) робота между его конструктивными элементами.

При проектировании ИУ робота необходимо учитывать погрешности, возникающие в ММ степеней подвижности (СП). Каждый ММ в процессе функционирования работает с некоторой погрешностью. Запишем условие точности работы ММ [2]:

$$\Delta q = \sum_{j=1}^m \Delta q_j = \Delta q_1 \sum_{j=1}^m \frac{\Delta q_j}{\Delta q_1} = \Delta q_1 \sum_{j=1}^m K_j \leq [\Delta q], \quad (1)$$

где Δq_j – погрешность j -го элемента, приведенная к выходному звену (выходному валу) ММ:

$$\Delta q_j = \Delta q'_j \xi_j; \quad (2)$$

Δq_1 – погрешность системы управления и двигателя (СУД) 1; Δq_2 – погрешность, вызванная упругой

деформацией вала 2 двигателя; Δq_3 – погрешность, вызванная упругой деформацией зубьев зубчатых колес 3 и 4 ЗКПД; Δq_4 – погрешность из-за упругой деформации вала 5; Δq_5 – погрешность, вызванная упругой деформацией зубьев зубчатых колес 6 и 7 ЦПД; Δq_6 – погрешность, вызванная упругой деформацией выходного вала 8; Δq_7 – кинематическая погрешность ЗКПД; Δq_8 – мертвый ход ЗКПД; Δq_9 – кинематическая погрешность ЦПД; Δq_{10} – мертвый ход ЦПД; $\Delta q'_j$ – погрешность j -го элемента ММ; $\xi_j = \frac{1}{U_j}$ передаточный коэффициент между j -м и выходными элементами (выходным валом) ММ [4]:

$$\xi_j = \prod_t^n \xi_t = \frac{1}{\prod_t^n U_t}.$$

Здесь $t = j$ при расчете погрешностей Δq_1 СУД и Δq_2 вала 2; $t = j + 1$ при расчете деформации Δq_4 вала 5, упругой деформации Δq_5 зубьев зубчатых колес 6 и 7, кинематической погрешности Δq_9 и мертвого хода Δq_{10} ЦПД; U_t – передаточное отношение между j -м и выходным валом 8; n – число зубчатых преобразователей движения; $[\Delta q]$ – заданное значение погрешности ММ; K_j – безразмерный коэффициент, учитывающий отношение j -ой погрешности ММ к первой:

$$K_j = \frac{\Delta q_j}{\Delta q_1}.$$

Поэтому погрешность j -го элемента:

$$\Delta q_j = K_j \cdot \Delta q_1. \quad (3)$$

Из условия (1) находим погрешность первого элемента СУД:

$$\Delta q_1 = \frac{[\Delta q]}{\sum_{j=1}^m K_j}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), найдем погрешность j -го элемента ММ, приведенную к его выходному звену:

$$\Delta q_j = \frac{K_j [\Delta q]}{\sum_{j=1}^m K_j}. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов K_j запишем выражение (1), объединяя погрешности, вызванные одинаковыми элементами, но имеющие различные параметры, т.е. погрешности Δq_2 , Δq_4 и Δq_6 валов 2, 5 и 8, погрешности Δq_3 и Δq_5 зубьев зубчатых колес 3–4

и 6–7, а также кинематические погрешности Δq_7 и Δq_9 и мертвый ход Δq_8 и Δq_{10} ЗКПД и ЦПД соответственно.

$$\Delta q = \sum_{j=1}^m \Delta q_j = \Delta q_1 + \Delta q_{2,4,6} + \Delta q_{3,5} + 2\Delta q_{7,9}(1+j) \leq [\Delta q] \quad (6)$$

Здесь $\Delta q_1 \approx q'_j \xi_j \approx (1...2) \cdot 10^{-4}$ рад. – погрешность СУД; $[\Delta q'_1] = (15...30) \cdot 10^{-4}$ – допускаемая погрешность СУД. Можно $[\Delta q'_1]$ принимать равной погрешности установленного на валу двигателя датчика

обратной связи по положению; $\xi_j = \frac{z_3 z_6}{z_4 z_7}$ –

передаточный коэффициент между двигателем l и выходным валом 8 ; $\Delta q_{2,4,6}$ – угол закручивания j -го вала, т.е. 2, 5, 8 валов [5]:

$$\Delta q_{2,4,6} = \sum_{j=1}^n \frac{T_j l_j \xi_j}{G_j J_{p_j}} \leq [\varphi_{0j}] l_j \xi_j,$$

где T_j – крутящий момент в поперечном сечении j -го вала, Н·мм; l_j – длина j -го вала, мм; $\xi_j = \frac{z_3 z_6}{z_4 z_7}$ –

передаточный коэффициент между вторым валом

(вторым элементом) и выходным валом; $\xi_j = \frac{z_6}{z_4}$ –

передаточный коэффициент между валом 5 (четвертым элементом) и выходным валом и $\xi_j = 1$ для вала 8; G_j – модуль упругости второго рода материала j -го вала. Для стали $G = (7,8 \dots 8,0) 10^4$ МПа; $J_{p_j} = 0,1 d_j^4$ – полярный момент инерции поперечного сечения j -го вала, мм⁴; d_j – диаметр j -го вала, мм; $[\varphi_{0j}] = (5 \dots 15) 10^{-4} \frac{\text{рад}}{\text{мм}}$ – допускаемый угол закручивания j -го вала [6]; $\Delta q_{3,5}$ – деформация зуба j -го зубчатого колеса [7]:

$$\Delta q_{3,5} = \sum_{j=1}^n \frac{F_j h_j^2 \xi_j}{2E_j J_{oc_j}} \leq [\Theta_j] \xi_j,$$

где F_j – сила, действующая на зуб j -го зубчатого колеса ЗКПД и ЦПД, Н·мм; h_j – длина зуба j -го зубчатого колеса, мм; $E_j = (2,0 \dots 2,2) 10^5$ МПа – модуль упругости первого рода материала j -го зубчатого колеса [8]; J_{oc_j} – осевой момент инерции поперечного сечения зуба j -го зубчатого колеса, мм⁴.

Приближенно его можно определить по формуле

$$J_{oc_j} \approx \frac{ab^3}{12},$$

где a – ширина зуба j -го зубчатого колеса (ширина зубчатого колеса), мм; b – толщина зуба по делительной

окружности зубчатого колеса, мм; $[\theta_j] = (5 \dots 10) 10^{-4}$ рад. – допускаемый угол поворота зуба j -го зубчатого колеса [9].

Таким образом, в формуле (6) неизвестными остаются кинематические погрешности и мертвый ход ЗКПД и ЦПД. Они связаны между собой следующей зависимостью:

$$\Delta q_{8,10} = \alpha \Delta q_{7,9}, \quad (7)$$

где $\alpha = 1,5 \dots 2,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение значения мертвого хода преобразователя движения (ПД) по сравнению с его кинематической погрешностью.

Тогда кинематическую погрешность ЗКПД и ЦПД можно записать в виде:

$$\Delta q_{7,9} \leq \frac{[\Delta q] - \Delta q_1 - \Delta q_{2,4,6} - \Delta q_{3,5}}{2(1 + \alpha)}.$$

По зависимости (7) можно найти значение мертвого хода ЗКПД и ЦПД.

Определим коэффициенты K_j :

$$K_1 = \frac{\Delta q_1}{\Delta q_1} = 1;$$

$$K_{2,4,6} = \frac{\Delta q_{2,4,6}}{\Delta q_1} = \frac{\sum_{j=1}^n T_j l_j \xi_j}{G_j J_{p_j} \Delta q_1} \leq \sum_{j=1}^n [\varphi_{0j}] l_j \xi_j;$$

$$K_{3,5} = \frac{\Delta q_{3,5}}{\Delta q_1} = \frac{\sum_{j=1}^n F_j l_j^2 \xi_j}{2E_j J_{oc_j} \Delta q_1};$$

$$K_{8,10} = \frac{\Delta q_{8,10}}{\Delta q_1} = \frac{\alpha \Delta q_{7,9}}{\Delta q_1} = \alpha K_{37};$$

$$K_{7,9} = \frac{\Delta q_{7,9}}{\Delta q_1} = \frac{[\Delta q] - \Delta q_1 - \Delta q_{2,4,6} - \Delta q_{3,5}}{2(1 + \alpha) \Delta q_1}.$$

Подставляя полученные значения K_j в формулу (5), можно найти погрешность j -го элемента, приведенную к выходному звену (валу) ММ, а затем по формуле (2) определить действительную погрешность каждого конструктивного элемента ММ, рассчитать все его геометрические параметры и выбрать модуль зубьев (чем меньше модуль зубьев, тем меньше кинематическая погрешность и мертвый ход ПД).

Таким образом, при разработке мехатронного модуля степени подвижности ИУ робота необходимо так проектировать его отдельные элементы, чтобы их погрешности были меньше расчетных. При этом погрешность ММ будет меньше заданной. Кроме того,

для уменьшения погрешности ММ, ПД в нем необходимо располагать в порядке убывания их передаточного коэффициента от входа к выходу, т.е. так, чтобы каждый последующий ПД, считая от двигателя, имел меньший передаточный коэффициент. Так как выходное звено 8 ММ жестко связано с функциональным звеном 9 ИУ робота, то уменьшение его погрешности приведет к уменьшению погрешности функционального звена, что в результате приведет к уменьшению погрешности всего робота, т.е. точность его работы вырастет. Поэтому проектирование ИУ робота необходимо проводить с учетом погрешностей каждого конструктивного элемента ММ.

Библиографический список

1. Егоров О.Д., Батунова В.А. Определение погрешности позиционирования робота с учётом первичных ошибок и погрешностей обобщённых координат // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2009. № 10. С. 19–25.
2. Егоров О.Д. Конструирование механизмов роботов: учебник / О.Д. Егоров. – М.: Абрис, 2012.
3. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Расчёт и конструирование мехатронных модулей: учеб. пособие / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. – М.: ГОУ ВПО «МГТУ «СТАНКИН», 2012.
4. Егоров О.Д. Механика электромеханических роботов: учеб. пособие / О.Д. Егоров. – М.: ГОУ ВПО «МГТУ «СТАНКИН», 2009.
5. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – 8-е изд., стереотип. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
6. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV – 1/ Д.Н. Решетов, А.П. Гусенков, Ю.Н. Дроздов и др.; – М.: Машиностроение, 1995.
7. Справочник конструктора точного приборостроения / Г.А. Веркович, Е.Н. Головенкин, В.А. Голубков и др.; – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989.
8. Гуревич Ю.В., Выров Б.Я., Косов М.Г., Кузнецов А. П. Инженерные основы расчётов деталей машин: учебник / Ю.В. Гуревич, Б.Я. Выров, М.Г. Косов, А.П. Кузнецов. – М.: КНОРУС, 2013.
9. Решетов Д.Н. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1989.

References

1. Egorov O.D., Baturova V.A. Determination of the positioning error of the robot, taking into account primary errors and errors of generalized coordinates // Vestnik MSUT "STANKIN". 2009. № 10. p. 19–25.
2. Egorov O.D. Design of robot mechanisms: textbook / O.D. Egorov. – M.: Abris, 2012.
3. Egorov O.D., Poduraev Yu.V. Calculation and design of mechatronic modules: textbook / O.D. Egorov, Yu.V. Poduraev. – M.: MSUT "STANKIN", 2012.
4. Egorov O.D. Mechanics of electromechanical robots: textbook / O.D. Egorov. – M.: MSUT "STANKIN", 2009.
5. Feodosiev V.I. Strength of materials. - 8th ed., stereotype. – M.: Science. Main edition of physical and mathematical literature, 1979.
6. Mechanical engineering. Encyclopedia. Volume IV – 1 / D.N. Reshetov, A.P. Gusenkov, Yu.N. Drozdov and others; – M.: Mashinostroenie, 1995.
7. Handbook of precision instrumentation designer / G.A. Verkovich, E.N. Golovenkin, V.A. Golubkov and others; – L.: Mechanical engineering. Leningrad department, 1989.
8. Gurevich Yu.V., Vyrov B.Ya., Kosov M.G., Kuznetsov A.P. Engineering bases of calculations of machine parts: textbook / Yu.V. Gurevich, B.Ya. Vyrov, M.G. Kosov, A.P. Kuznetsov. – M.: KNORUS, 2013.
9. Reshetov D.N. Machine parts: a textbook for students of engineering and mechanical specialties of universities. – M.: Mashinostroenie, 1989.

Егоров Олег Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
egorvod@yandex.ru

Egorov Oleg Dmitrievich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of "Robotics and Mechatronics", MSUT "STANKIN"
egorvod@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The author have no conflicts of interest to declare.

2.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.836.7.001.63

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛЬТИЙСКИХ МЕХАНИЗМОВ ВНУТРЕННЕГО ПРОФИЛЯ

А.Н. Соболев, А.В. Ривкин, А.Я. Некрасов, М.О. Арбузов
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Приведён обзор конструкций мальтийских механизмов внутреннего профиля (внутреннего зацепления). Данные механизмы могут эффективно использоваться в сборочных модулях гибких производственных систем. Приведены начальные расчеты технологических показателей оборудования с мальтийскими механизмами. Разработано программное приложение автоматизированного проектирования и расчета мальтийских механизмов с использованием CAD-систем, с помощью которого также могут быть подготовлены управляющие программы для изготовления деталей механизма на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: мальтийский механизм, внутренний профиль, 3D-модели, автоматизированное проектирование, CAD-системы.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF MALTESE INTERNAL PROFILE MECHANISMS

A.N. Sobolev, A.V. Rivkin, A.Ya. Nekrasov, M.O. Arbuzov
MSUT «STANKIN»

Abstract

An overview of the designs of the Maltese mechanisms of the internal profile (internal gearing) is given. These mechanisms can be effectively used in assembly modules of flexible manufacturing systems. The initial calculations of technological indicators of equipment with Maltese mechanisms are given. A software application for computer-aided design and calculation of Maltese mechanisms using CAD systems has been developed, with the help of which control programs can also be prepared for the manufacture of mechanism parts on CNC machines.

Keywords: Maltese mechanism, internal profile, 3D-models, computer-aided design, CAD systems.

Введение

Мальтийский механизм – это механизм прерывистого движения, преобразующий равномерное вращательное движение ведущего звена (води́ла) в прерывистое вращательное движение ведомого звена (креста). Ведомое звено мальтийского механизма может быть кинематически связано с другими звеньями технологической машины [1].

Основными элементами мальтийского механизма являются крест, водило, ролик, фиксатор и замыкатели. Часто функции некоторых указанных элементов обеспечиваются самой конструкцией креста и водила. Одной из главных характеристик мальтийского механизма является рабочий угол. Это величина, характеризующая угол поворота ведущего вала, за который происходит перемещение ведомого вала. Считая, что полный цикл работы механизма происходит за поворот вала водила на 360 градусов, можно вычислить угол, при котором крест остается неподвижным. У мальтийского механизма с четырехлопастным крестом рабочий угол составляет 90 градусов, что означает угол покоя 270 градусов. Соответственно, КПД будет равен 0,75. Таким образом, чем меньше рабочий угол, тем выше КПД механизма.



Рис. 1. Мальтийский механизм внутреннего профиля (вариант 1)



Рис. 3. Мальтийский механизм внутреннего профиля (вариант 3)

Разновидности мальтийских механизмов внутреннего профиля

Рассмотрим примеры моделей мальтийских механизмов внутреннего профиля.

На *рис. 1* представлен механизм, у которого отношение периода неподвижности креста к периоду движения составляет 1:2. Угол каждого поворота ведомого вала составляет 120°.

На *рис. 2* представлен механизм, у которого отношение периода неподвижности креста к периоду движения составляет 1:3. Угол каждого поворота ведомого вала составляет 90°.

На *рис. 3* приведен механизм, у которого отношение периода неподвижности креста к периоду движения составляет 1:5. Угол каждого поворота ведомого вала составляет 60°.

На *рис. 4* представлен механизм, у которого отношение периода неподвижности креста к периоду движения составляет 1:3. Угол каждого поворота ведомого вала составляет 90 градусов.

По кинематике движения механизм мальтийского креста аналогичен рычажному кривошипно-кулисному механизму (*рис. 5*).

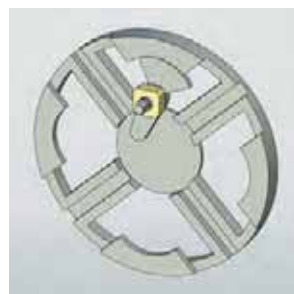


Рис. 2. Мальтийский механизм внутреннего профиля (вариант 2)



Рис. 4. Мальтийский механизм внутреннего профиля (вариант 4)

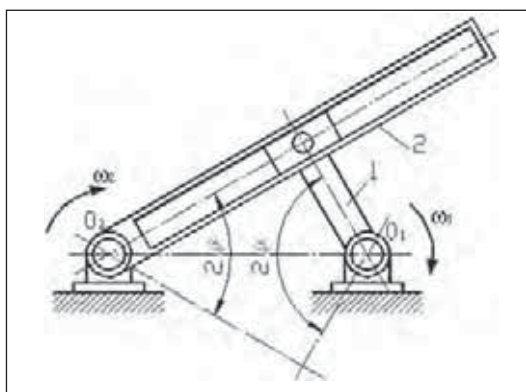


Рис. 5. Эквивалентный рычажный механизм
 1 – кривошип; 2 – кулиса; ω_1 – угловая скорость кривошипа;
 ω_2 – угловая скорость кулисы; $2\varphi_1$ – расчетный угол поворота кривошипа; $2\varphi_2$ – угол размаха кулисы

Коэффициент времени работы мальтийского механизма (отношение времени поворота креста ко времени его покоя) с внутренним зацеплением составит [2]

$$k = \frac{z + 2}{z - 2}, \quad (1)$$

где z – число пазов мальтийского креста.

Значения коэффициента k в мальтийских механизмах с внутренним зацеплением больше единицы, то есть в этих механизмах время деления всегда больше времени остановки креста.

Применение мальтийских механизмов внутреннего профиля

Мальтийские механизмы внутреннего профиля широко применяются в сборочных модулях круговой тактовой конструкции гибких производственных систем [3–6].

Рассмотрим пример. Пусть сборочный модуль круговой тактовой конструкции имеет 8 позиций ($p = 8$), а стол поворачивается с помощью мальтийского механизма, у которого кривошип вращается с частотой $n = 30$ об/мин. Определим основные технологические показатели: технологическую производительность модуля K , время рабочих ходов, суммарное время технологического воздействия на одну деталь $t_{\Sigma p}$.

За каждый поворот кривошипа стол перемещается на одну позицию, поэтому на выходе получают одно готовое изделие, следовательно, технологическая производительность будет равна $K = 30$ шт/мин.

Технологическая производительность мальтийского механизма:

$$K = \frac{1}{t_p}, \quad (2)$$

где t_p – время рабочих ходов, т.е. тот промежуток времени, через который будет получено готовое изделие.

Из формулы (2) следует, что время рабочих ходов можно определить, как

$$t_p = \frac{1}{K} = \frac{60}{30} = 2 \text{ с/шт.}$$

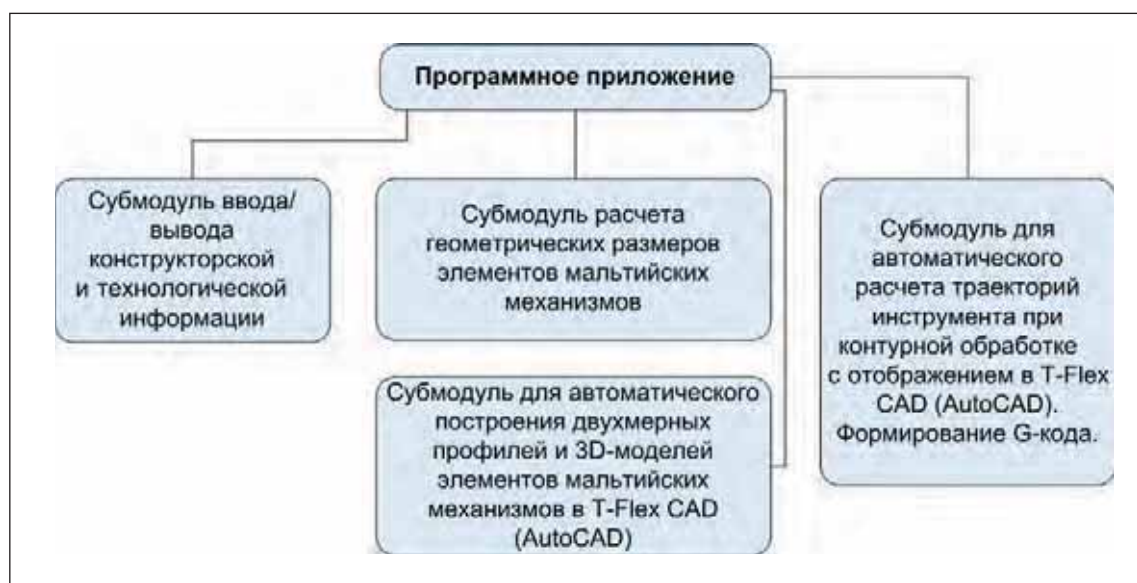


Рис. 6. Структура разработанного программного приложения

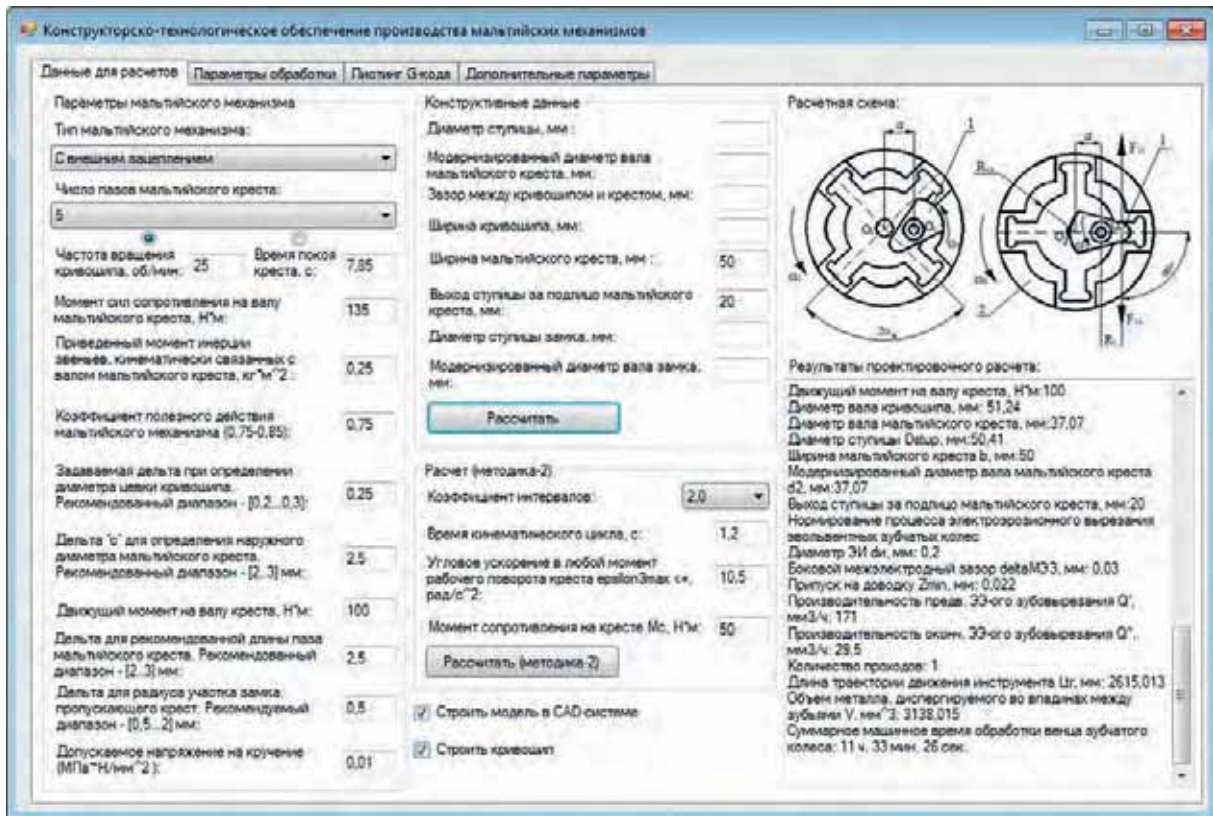


Рис. 7. Общий вид программного приложения

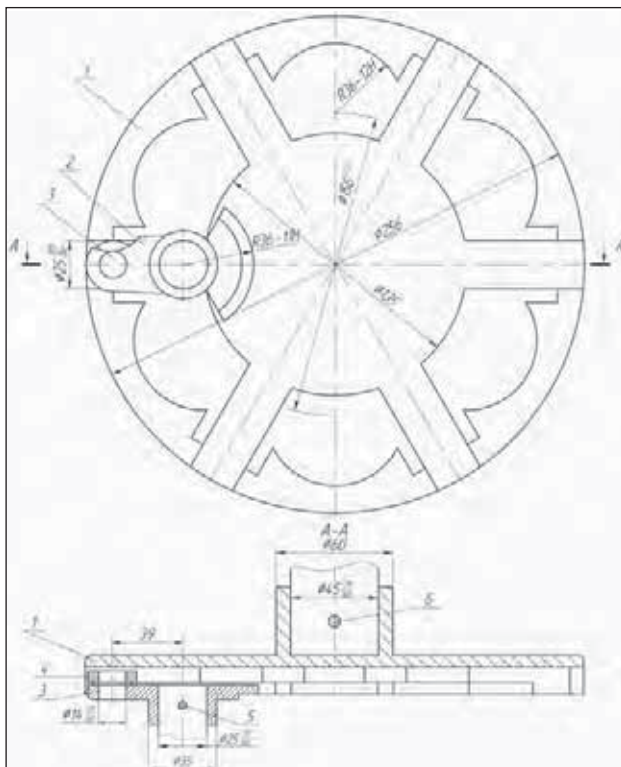


Рис. 8. Сгенерированный программным приложением чертеж планетарного механизма внутреннего зацепления в САД-системе:

1 – крест; 2 – водило; 3 – ось; 4 – ролик; 5 – штифт 5×35; 6 – штифт 6×50

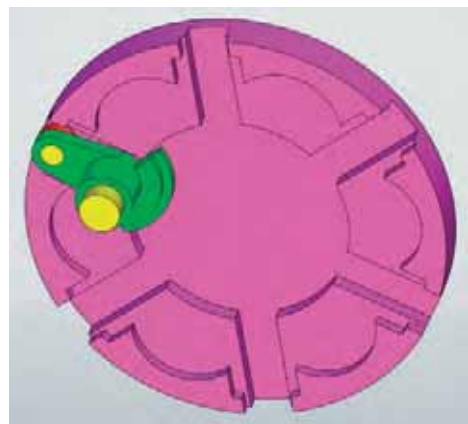


Рис. 9. Автоматическое формирование 3D-модели механизма внутреннего зацепления с помощью программного приложения



Рис. 10. Автоматическое формирование 3D-модели механизма внешнего зацепления с помощью программного приложения

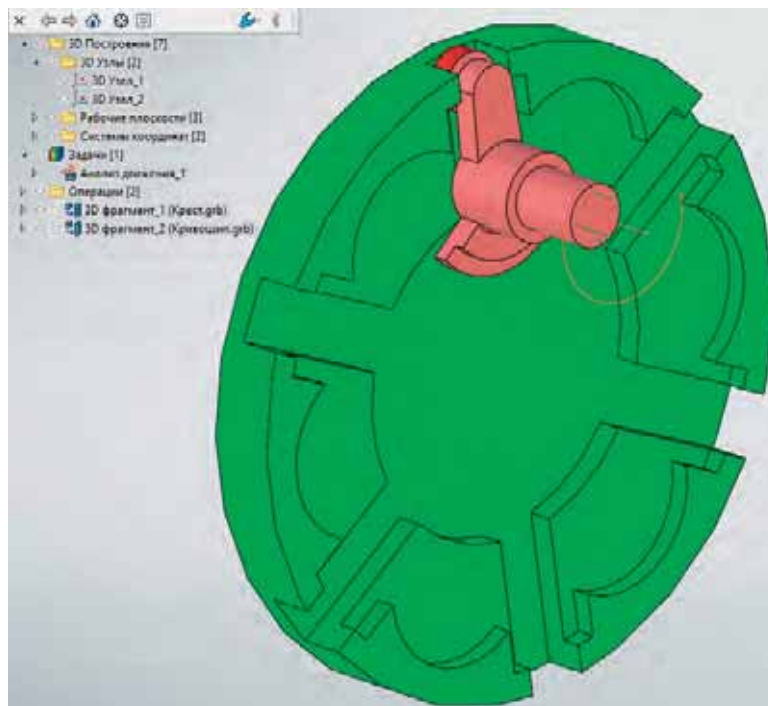


Рис. 11. Результаты автоматизированного расчета и проектирования элементов мальтийского механизма

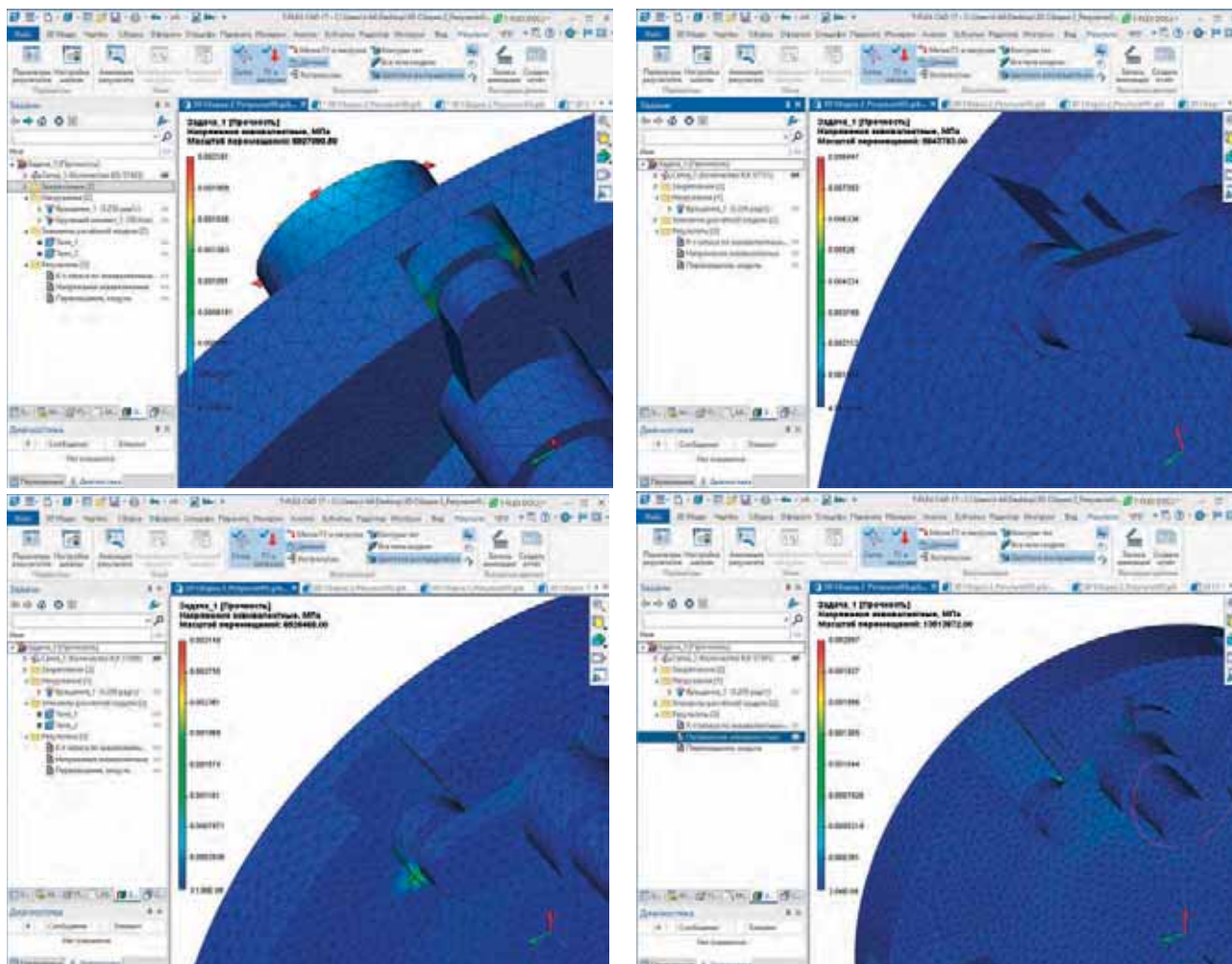


Рис. 12. Действующие напряжения в элементах конструкции мальтийского механизма при различных положениях кривошипа

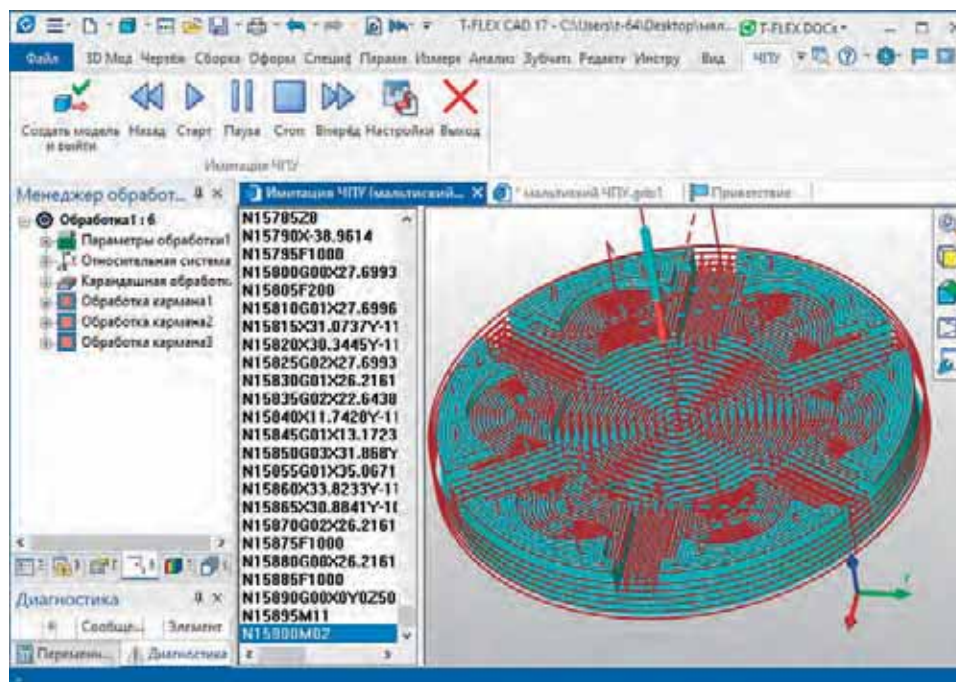


Рис. 13. Моделирование изготовления мальтийского креста по сгенерированной с помощью приложения модели

Суммарное время технологического воздействия на заготовку – это время, за которое изделие пройдет все позиции сборочного модуля. Оно может быть найдено по формуле

$$t_{\Sigma p} = p \cdot t_p, \quad (3)$$

где p – число рабочих позиций, $t_{\Sigma p} = 2 \cdot 8 = 16$ с.

Автоматизация проектирования мальтийских механизмов внутреннего профиля

Ускорение процесса проектирования мальтийских механизмов является одной из важных задач машиностроения. С целью ее эффективного решения авторами разработано программное приложение автоматизированного расчета и построения чертежей и моделей мальтийских механизмов. Автоматическое построение осуществляется в САПР T-Flex CAD на основе технологии API (application programming interface – интерфейс прикладного программирования). Само программное приложение создано на языке C#. Также разработана версия программного приложения для проектирования мальтийских механизмов внешнего и внутреннего профиля в среде AutoCAD. Разработка методики и средств автоматизированного проектирования мальтийских механизмов велась на основе положений, изложенных в работах [7–13].

Структура приложения представлена на рис. 6. Общий вид программного приложения приведен на рис. 7.

На рис. 8 и 9 представлены результаты автоматического создания чертежей и моделей механизмов в САД-системе с использованием разработанного программного приложения посредством технологии API.

Алгоритм автоматизированного расчета геометрии мальтийских механизмов, реализованный в программе, базируется на положениях, изложенных в работе [1].

По моделям деталей мальтийских механизмов, автоматически сгенерированных в программном приложении, могут быть подготовлены управляющие программы для станков с ЧПУ в среде T-Flex CAM. Кроме того, в самом программном приложении существует возможность автоматической генерации G-кода для выполнения контурного фрезерования деталей мальтийских механизмов без использования внешнего САМ-модуля.

Разработанное авторами программное обеспечение также обеспечивает автоматизированное проектирование мальтийских механизмов внешнего зацепления (рис. 10).

Сформированная 3D-модель мальтийского механизма внутреннего зацепления позволяет выполнить кинематический расчет, при этом обеспечивается возможность как оперативного исправления ошибок конструирования (рис. 11), так и проведения расчета на прочность элементов конструкции (рис. 12). Из представленных диаграмм распределения напряжений следует, что наиболее нагруженным элементом механизма является палец кривошипа.

Заключение

В представленной работе показано, что в современной технике целесообразно достаточно широкое использование мальтийских механизмов внутреннего профиля. Данные механизмы могут эффективно использоваться в сборочных модулях круговой тактовой конструкции гибких производственных систем.

Авторами было разработано программное приложение и методика автоматизированного проектирования, которые существенно упрощают и ускоряют процесс конструкторско-технологической подготовки производства деталей мальтийских механизмов внешнего и внутреннего профиля с использованием САД-систем.

Разработанная авторами методика автоматизированного проектирования была успешно апробирована путем изготовления деталей мальтийских механизмов на современном машиностроительном оборудовании с помощью САМ-модуля T-Flex (рис. 13).

Различные методики автоматизированного проектирования являются залогом качественной подготовки выпускников технических университетов. Разработанная авторами процедура сквозного проектирования мальтийских механизмов нашла применение в рамках учебных курсов кафедры станков ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», что повысило интерес обучающихся к изучаемым предметам и творческой не рутинной проектной деятельности.

Библиографический список

1. Sobolev A.N. and Nekrasov A.Ya. CAD/CAE Modeling of Maltese Cross Mechanisms in Machine Tools, Russian Engineering Research, 2016, 36, p. 300–302.
2. Сперанский Н.В. Проектирование мальтийских механизмов – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 96 с.
3. Харламов С.В. Конструирование технологических машин пищевых производств: учеб. пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1979 г. – 224 с., ил.
4. Харламов С.В. Практикум по расчету и конструированию машин и аппаратов пищевых производств. – Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1991. – 256 с., ил.
5. Болотин Х.Л. Механизация и автоматизация станочных приспособлений. – М.: Машгиз, 1962. – 287 с., ил.
6. Заблонский К.И., Белоконов И.М., Щекин Б.М. Теория механизмов и машин: учебник. Киев: Высшая школа, 1989. – 376 с.

7. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Implementation of packing methods for the orthogonal packing problems, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2016, 88, p. 421–430.

8. Chekanin V.A., Chekanin A.V. An efficient model for the orthogonal packing problem, Advances in Mechanical Engineering, 2015, 22, p. 33–38.

9. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Algorithm for the Placement of Orthogonal Polyhedrons for the Cutting and Packing Problems, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020, p. 41–48.

10. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Development of Algorithms for the Correct Visualization of Two-Dimensional and Three-Dimensional Orthogonal Polyhedrons, Lecture Notes in Electrical Engineering, 641, 2020, p. 891–900.

11. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya. Research of Characteristics and Parameters of Cycloidal Gear International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, p. 1169–1179.

12. Rivkin A.V., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N., Arbuzov M.O. The features of the gears profile forming by the electrical discharge machining Materials Today: Proceedings, 2021, p. 1358–1363.

13. Rivkin A.V., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N., Arbuzov M.O. Rationalization of load distribution in multi-pair gearing based on a discrete contact model, Materials Today: Proceedings, 2021, p. 1392–1396.

References

1. Sobolev A.N. and Nekrasov A.Ya. CAD/CAE Modeling of Maltese Cross Mechanisms in Machine Tools, Russian Engineering Research, 2016, 36, p. 300–302.
2. Speransky N.V. Design of Maltese mechanisms – M.: Publishing house Acad. Sciences of the USSR, 1960. – 96 p.
3. Kharlamov S.V. Designing technological machine-food production: textbook for universities. – L.: Mashinostroenie, 1979 – 224 p.
4. Kharlamov S.V. Workshop on the calculation and design of machines and apparatus for food production. – L.: Agropromizdat. Leningrad branch, 1991. – 256 p.
5. Bolotin H.L. Mechanization and automation of machine tools. – M.: Mashgiz, 1962. – 287 p.
6. Zablonsky K.I., Belokonev I.M., Shchekin B.M. Theory of mechanisms and machines: textbook. Kyiv: Higher School, 1989. – 376 p.
7. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Implementation of packing methods for the orthogonal packing problems, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2016, 88, p. 421–430.

8. Chekanin V.A., Chekanin A.V. An efficient model for the orthogonal packing problem, *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 22, p.33–38.

9. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Algorithm for the Placement of Orthogonal Polyhedrons for the Cutting and Packing Problems, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020, p. 41–48.

10. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Development of Algorithms for the Correct Visualization of Two-Dimensional and Three-Dimensional Orthogonal Polyhedrons, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 641, 2020, p. 891–900.

11. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya. Research of Characteristics and Parameters of Cycloidal Gear International Conference on Industrial Engineering, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, p. 1169–1179.

12. Rivkin A.V., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N., Arbuzov M.O. The features of the gears profile forming by the electrical discharge machining *Materials Today: Proceedings*, 2021, p. 1358–1363.

13. Rivkin A.V., Nekrasov A.Ya., Sobolev A.N., Arbuzov M.O. Rationalization of load distribution in multi-pair gearing based on a discrete contact model, *Materials Today: Proceedings*, 2021, p. 1392–1396.

Соболев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

t-64@mail.ru

Ривкин Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

alexey-rivkin@yandex.ru

Некрасов Алексей Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

a.nekrasov@stankin.ru

Арбузов Михаил Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

arbuzov428@yandex.ru

Sobolev Alexander Nikolaevich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT «STANKIN»

t-64@mail.ru

Rivkin Alexey Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT «STANKIN»

alexey-rivkin@yandex.ru

Nekrasov Alexey Yakovlevich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT «STANKIN»

a.nekrasov@stankin.ru

Arbuzov Michael Olegovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT «STANKIN»

arbuzov428@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.91.01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ АЛЬФА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Е.В. Фомин, К.К. Снегирева, В.А. Слущков
Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования чистового продольного точения альфа титанового сплава 3М. По результатам эксперимента были составлены математические модели шероховатости обработанной поверхности, выраженной параметром Ra, микротвердости HV и коэффициента эффективности диссипации энергии η . Корреляционная связь между двумя параметрами состояния обработанной поверхности и эффективностью диссипации энергии была обнаружена посредством коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

Ключевые слова: сплав 3М, металлообработка, эксперимент, обрабатываемость резанием, шероховатость поверхности, микротвердость, коэффициент диссипации энергии.

EXPERIMENTAL STUDY OF MACHINABILITY ALPHA TITANIUM ALLOY

E.V. Fomin, K.K. Snegireva, V.A. Slutskov
Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov

Abstract

The article presents the results of an experimental study of finishing longitudinal turning of a 3M titanium α -alloy. Based on the results of the experiment, mathematical models of the roughness of the machined surface, expressed by the parameter Ra, microhardness HV, and the energy dissipation efficiency factor η , were compiled. The correlation relationship between the two parameters of the state of the treated surface and the efficiency of energy dissipation was found through the Spearman rank correlation coefficient.

Keywords: 3M alloy, metalworking, experiment, machinability, surface roughness, microhardness, energy dissipation coefficient.

Введение

Титановые сплавы прочно заняли позицию одного из основных материалов в таких важных отраслях как тяжелое машиностроение и авиастроение. Из этих сплавов изготавливают ответственные изделия с высокой прочностью, обладающие небольшой массой.

Вследствие низкой обрабатываемости резанием титановых сплавов, добиться требуемых характеристик поверхностного слоя деталей машин бывает крайне сложно. Низкий модуль упругости, а также выраженные абразивные свойства приводят к возникновению вибраций и существенному износу инструмента, что негативно сказывается на шероховатости обработанной поверхности, создает наклеп.

Литературный анализ по данному вопросу показал, что информации, посвященной условиям обработки резанием титановых сплавов, крайне мало. Как правило, она носит обобщенный характер, без учета принадлежности сплава к той или иной структурной группе. Данные аргументы свидетельствуют об актуальности экспериментального исследования обрабатываемости каждой группы титановых сплавов в отдельности.

Проблема обеспечения надежного прогнозирования заданных параметров обработанной поверхности зависит, прежде всего, от действия физико-механических процессов в зоне пластической деформации, в основе которых лежит принцип самоуправления процесса резания. Попытки аналитическим путем выявить закономерность взаимосвязи между параметрами зоны стружкообразования с широким диапазоном изменений условий обработки не всегда успешны. Весьма вероятно, что экспериментальные исследования будут более продуктивными [1].

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы определить рациональные с точки зрения получения заданного комплекса параметров качества поверхности режимы чистовой лезвийной обработки альфа титанового сплава ЗМ, рассчитанные по методике, позволяющей охарактеризовать протекание процесса резания по энергетическому показателю – коэффициенту эффективности диссипации энергии [2]. Она разработана в соответствии с гипотезой, согласно которой при минимальном значении диссипации механической энергии, сообщаемой заготовке через режущий инструмент в технологической системе резания, в зоне стружкообразования будут создаваться благоприятные для срезания слоя металла условия. Следует отметить, что данный подход позволяет оценивать протекание процесса обработки, обобщая влияние всех существующих внутренних и внешних факторов, сопутствующих процессу резания материала.

Методы и материалы

Согласно матрице планирования [3], на токарно-винторезном станке 16Б16КА особо высокой точности проведен эксперимент (рис. 1) с применением динамометра М30-3-6к производства компании «ТИЛКОМ» (Белоруссия), в который через адаптер устанавливался прямой упорный токарный резец, а сам датчик был подключен к персональному компьютеру. Предварительно обработанная заготовка закреплялась на станке с использованием трехручачкового патрона и вращающегося центра. Для сбора стружки использовалась емкость, установленная на поперечные салазки оборудования.

Параметр шероховатости поверхности образцов после токарной обработки определялся с помощью автоматизированного мобильного профилометра контактного типа Mitutoyo SJ-201 (Япония). Изменялось среднеарифметическое отклонение профиля Ra на пяти участках поверхности образцов. Базовая длина 0,8 мм устанавливалась в автоматизированном режиме в соответствии с ГОСТ 2789-73.

Значения микротвердости поверхности образцов после токарной обработки определялись с помощью микротвердомера ПМТ-3М по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 и инструкции по эксплуатации.

Коэффициент эффективности диссипации энергии η определялся расчетным путем. Величины, которые входят в состав формулы для расчета указанного коэффициента, определялись экспериментально.

Составляющие силы резания P_z и P_y фиксировались с помощью трехкомпонентного динамометра модели М30-3-6к. Запись показаний прибора выполнялась при помощи персонального компьютера с установленным программным обеспечением «Датчик» того же производителя.

Коэффициент усадки стружки k_l определяется весовым методом. Толщина переходной пластически деформированной зоны измерялась с помощью металлографического микроскопа типа Альтами МЕТ 4С и подключенной к нему окулярной цифровой USB камеры Альтами UCМOS05100КРА (Россия).

Для проверки гипотезы о существовании зависимости между коэффициентом эффективности диссипации энергии и шероховатостью обработанной поверхности, выраженной через параметр Ra , и возникшим наклепом, выраженным через параметр микротвердости HV , сперва были составлены математические зависимости (модели) указанных величин от технологических параметров обработки материалов резанием, которые были выбраны в качестве экспериментальных факторов. Затем опреде-

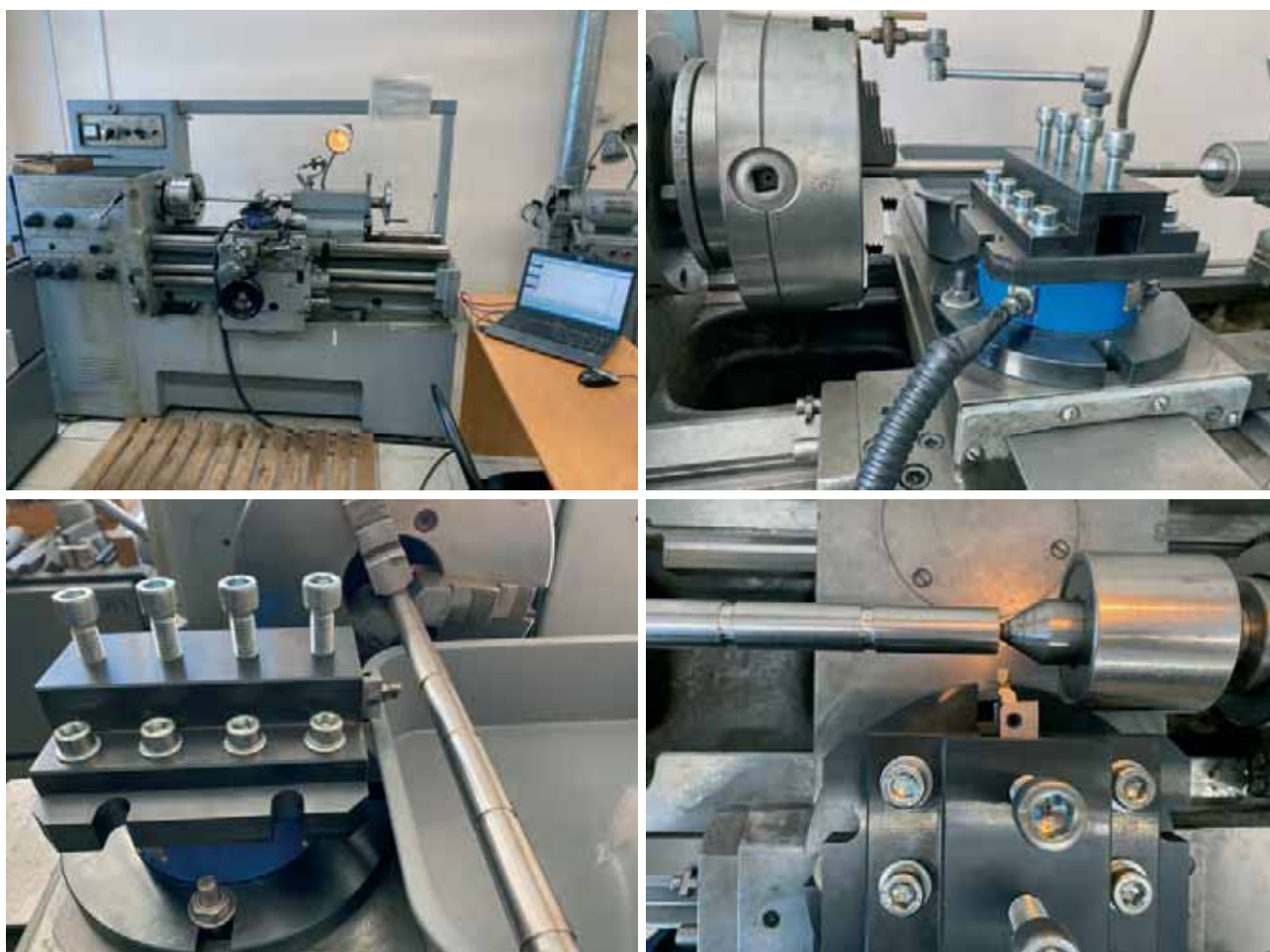


Рис. 1. Проведение эксперимента

лялось наличие или отсутствие корреляции между указанными величинами.

В рамках каждого опыта [3] было проведено по пять измерений: при составлении математической модели шероховатости поверхности измерялся параметр Ra , при составлении математической модели коэффициента диссипации энергии – коэффициент усадки стружки K_f , а также толщина переходной пластически деформированной зоны Δx .

Результаты

После обработки результатов были получены следующие математические зависимости.

Математическая модель шероховатости обработанной поверхности имеет вид:

$$Ra = -0,26 + 0,005v + 5,983S + 0,154t - 0,035vS + 0,02vt - 2,98St, \quad (1)$$

где v – скорость главного движения, м/мин; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм.

Математическая модель коэффициента эффективности диссипации энергии выглядит следующим образом:

$$\eta = 1,713 - 0,013v - 8,347S - 2,019t + 0,073vS - 0,002vt + 15,059St. \quad (2)$$

Для изучения величины наклепанного слоя, возникшего после чистового точения сплава 3М, заготовка (рис. 1, [3]) была разделена на отдельные образцы. Каждый образец был отфрезерован с двух противоположных сторон. Таким образом, один отфрезерованный участок послужил опорной поверхностью для установки образца на микротвердомере ПМТ-3М, второй был использован для проведения измерений. В результате исследования была получена математическая модель микротвердости обработанной поверхности:

$$HV = 167,165 + 0,622v + 304,152S + 75,337t - 3,659vS - 443,162St. \quad (3)$$

После составления всех трех математических моделей, было рассчитано множество значений η , Ra и HV , чтобы проверить гипотезу при помощи коэффициента ранговой корреляции.

Обсуждение

Проверка гипотезы осуществлялась с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена, который используется для оценки тесноты связи между двумя совокупностями количественных показателей.

Поскольку сравнивались функции $\eta = f(v, S, t)$, $Ra = f(v, S, t)$, $HV = f(v, S, t)$, которые сосуществуют одновременно при одном и том же сочетании v , S и t , то для определения значения коэффициента корреляции Спирмена были рассчитаны значения вышеуказанных величин при различных комбинациях v , S и t (всего 112 сочетаний), а затем определены значения коэффициента корреляции Спирмена ρ_s и критерий Стьюдента $t_{\text{расч}}$. Оба показателя и значения η , Ra и HV были рассчитаны с помощью программы Microsoft Excel.

Зависимость η от выбранных факторов оказалась достаточно сложной. Коэффициент η в рамках каждого значения v убывал при увеличении t при величинах S : 0,08, 0,1 и 0,12 мм/об. При значении S , равном 0,15 мм/об, этот параметр поменял характер своего проявления – начинал возрастать. Причем, следует отметить, что, чем сильнее рассматриваемое значение величины S удалялось от 0,15 мм/об, тем больше была разность между соседними значениями η при изменении глубины резания в пределах одного значения подачи.

Установив эту закономерность, было принято решение разделить все η на две группы: убывающие значения η и возрастающие. После этого можно проверить, будет ли связь между Ra и η в каждой группе. Результаты анализа приведены в *табл. 1*.

Так как в обоих случаях расчетный критерий Стьюдента $t_{\text{расч}}$ оказался больше табличного критического значения $t_{\text{кр}}$, корреляцию в обеих группах можно считать значимой.

В группе, где η убывает, ρ_s имеет отрицательное значение, следовательно, в этом диапазоне подач между Ra и η существует обратная связь, а так как коэффициент ранговой корреляции Спирмена больше 0,851, эту связь можно считать весьма тесной [4].

В группе, где η возрастает, ρ_s положителен и гораздо меньше, чем в первом случае. То есть при значениях подач, равных или больших 0,15 мм/об, наблюдается прямая связь между Ra и η , именуемая при превышении коэффициента ранговой корреляции Спирмена 0,341 как заметная [4].

Затем был проведен расчет, позволяющий определить наличие или отсутствие связи между HV и η по тому же алгоритму.

Анализ значений HV показал, что зависимость микротвердости от выбранных факторов носит сложный характер. При каждом значении v наблюдалась одна и та же тенденция, очень схожая с поведением η . HV возрастала с увеличением S до 0,17 мм/об включительно. При 0,17 мм/мин имела практически одинаковое значение при разных t , отличающееся на сотые доли. После S , равного 0,17 мм/об, HV начинала убывать с увеличением t .

Таблица 1

Определение корреляции между Ra и η

	Количество, n	ρ_s	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{кр}}(0,05; n-1)$	Вывод
Убывающие значения η	48	-0,878	12,467	2,013	ранговая корреляция значима
Возрастающие значения η	64	0,355	2,993	2,000	ранговая корреляция значима

Таблица 2

Определение корреляции между HV и η

Количество значение величин, n	ρ_s	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{кр}}(0,05; n-1)$	Вывод
112	-0,816	14,815	1,984	ранговая корреляция значима

Результаты расчетов проверки наличия корреляции между HV и η приведены в *табл. 2*.

Учитывая всю совокупность значений, между HV и η была обнаружена значимая обратная тесная связь.

Заключение

В соответствии с выполненными исследованиями можно сделать следующие выводы:

С увеличением коэффициента эффективности диссипации энергии η величина наклепа, выраженная через микротвердость поверхности HV , будет уменьшаться. То есть, чем интенсивнее протекают диссипативные механизмы при обработке материала резанием, тем наклеп будет меньше. Это согласуется с существующим утверждением о том, что при механической обработке в зоне резания одновременно действуют значительные усилия, создающие наклеп, и теплота, вызывающая разупрочнение металла. Таким образом, конечное состояние поверхностного слоя будет определяться соотношением скоростей протекания процессов упрочнения и разупрочнения [5, 6].

Связь между шероховатостью обработанной поверхности, выраженной через параметр Ra , и коэффициентом эффективности диссипации энергии η оказалась неоднозначной. Установлено, что при небольших значениях подач S (0,08–0,12 мм/об) между Ra и η существует тесная связь. Но, так как коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ_s в этом диапазоне имеет отрицательный знак, это означает, что зависимость между указанными величинами обратная. То есть с уменьшением η параметр Ra будет возрастать, а качество поверхности будет ухудшаться.

При больших значениях подач S (0,15–0,25 мм/об) связь между параметрами η и Ra ослабевает. И, кроме того, меняется характер зависимости – параметр ρ_s приобретает положительное значение. Это говорит о том, что при уменьшении η параметр Ra будет также уменьшаться, а качество поверхности – улучшаться. Сделано предположение, что существование переломного значения подачи свидетельствует о смене характера разрушения при стружкообразовании. Происходит переход к более энергетически выгодному варианту [7]. Также переломное значение подачи может оказаться свидетельством возникновения так называемого провала пластичности (высокотемпературного охрупчивания) [8, 9, 10].

Наличие корреляционной связи между коэффициентом эффективности диссипации энергии и шероховатостью поверхности, а также микро-

твердостью поверхностных слоев, позволяет предположить, что она может иметь место и в случае с другими параметрами обработанной поверхности, например, остаточными напряжениями, либо параметрами процесса: интенсивностью изнашивания режущего инструмента, тепловыделением, минимальным значением потребляемой мощности и др.

Обнаружение переломного значения подачи дает возможность предположить, что при проведении дополнительных исследований можно будет связывать величину коэффициента эффективности диссипации энергии с определенным видом разрушения, развивающимся в материале после прохождения им зоны первичной пластической деформации. Это позволит осуществить процедуру прогнозирования состояния поверхности. Так, например, при обработке в режиме вязкого разрушения можно исключить появление микротрещин в поверхностном слое детали.

Математические зависимости «качество поверхности – режим резания» позволят установить прямую связь «эксплуатационная характеристика – режим резания», которую можно непосредственно использовать для назначения режимов резания, обеспечивающих эксплуатационные характеристики, заданные конструктором.

Библиографический список

1. Нодельман, М.О. Некоторые вопросы самоуправления процесса резания пластичных металлов / М. О. Нодельман, Б.М. Суховилов // Вестник машиностроения / Машиностроение. – 1997. – № 10. – С. 39–42.
2. Кремлева, Л.В. Методика расчета коэффициента диссипации энергии при резании материалов / Л.В. Кремлева, К.К. Снегирева, И.В. Ершова // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» № 4(31), 2014. – С. 119–122.
3. Фомин, Е.В. Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов / Е.В. Фомин, К.К. Снегирева // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2022. – № 1(60). – С. 32–36.
4. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.
5. Варгасов, Н.Р. Технология обработки поверхности деталей: учебное пособие / Н.Р. Варгасов, Н.А. Пестов. – Северодвинск: Севмашвтуз, 2010. – 92 с. – Библиогр.: с. 91.

6. Технологические процессы в машиностроении. Назначение режимов резания и нормирование операций механической обработки заготовок в машиностроении: учебное пособие для вузов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев, В.Г. Юрьев, М.А. Афанасенков. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 248 с. – ISBN 978-5-8114-8508-6. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/197529> (дата обращения: 03.05.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

8. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

9. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

10. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на основе высокотемпературного охрупчивания при резании: монография / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2016. – 162 с. – ISBN 978-5-9961-1204-3. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/91814> (дата обращения: 02.05.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

References

1. Nodel'man M.O., Sukhovilov B.M. Some issues of self-management of the process of cutting ductile metals. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1997, no. 10, pp. 39–42. (in Russian).

2. Kremleva L.V., Snegireva K.K., Ershova I.V. Methodology for calculating the energy dissipation coefficient when cutting materials. *Vestnik MSUT "Stankin"* ["Bulletin of MSUT "Stankin"]. Moscow, Moscow State University of Technology "STANKIN" Publ., 2014, no. 4(31), pp. 119–122. (in Russian).

3. Fomin E.V., Snegireva K.K. Planning an Experimental Study of Machinability of Alpha Titanium Alloys. *Vestnik MSUT "Stankin"* ["Bulletin of MSUT "Stankin"]. Moscow, Moscow State University of Technology "STANKIN" Publ., 2022, no. 1(60), pp. 32–36. (in Russian).

4. Kremer N.Sh. *Teoriya veroyatnostey imatematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2004. 573 p.

5. Vargasov N.R. *Tekhnologiya obrabotki poverkhnosti detaley* [Parts Surface Treatment Technology]. Severodvinsk, Sevmashtuz Publ., 2010. 92 p.

6. Zubarev Yu. M., Priemyshev A. V., Yuriev V.G., Afanasenkov M.A. *Tekhnologicheskiye protsessy v mashinostroyenii. Naznacheniyе rezhimov rezaniya i normirovaniye operatsiy mekhanicheskoy obrabotki zagotovok v mashinostroyenii* [Technological processes in mechanical engineering. Assignment of cutting conditions and standardization of machining operations of workpieces in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2022. 248 p. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 3 May 2022).

7. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 344 p.

8. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 278 p.

9. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2009. 640 p.

10. Artamonov E.V., Vasilega D.S., Vasiliev D.V., Uteshev M. Kh. *Formirovaniye usloviy maksimal'noy obrabatyvayemosti zharoprochnykh materialov na osnove vysokotemperaturnogo okhrupchivaniya pri rezanii* [Formation of conditions for maximum machinability of heat-resistant materials based on high-temperature embrittlement during cutting]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2016. 162 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/91814> (Accessed 2 May 2022).

Фомин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии металлов и машиностроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
e.fomin@narfu.ru

Снегирева Ксения Константиновна – старший преподаватель кафедры технологии металлов и машиностроения, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
k.snegireva@narfu.ru

Слуцков Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования подъемно-транспортного и технологического оборудования, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
v.slutskov@narfu.ru

Fomin Evgeniy Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, Head of the department of “Metal Technology and Mechanical Engineering”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
e.fomin@narfu.ru

Snegireva Ksenia Konstantinovna – senior lecturer at the department of “Metal Technology and Mechanical Engineering”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
k.snegireva@narfu.ru

Slutskov Vladimir Anatolevich – candidate Sc. of Engineering, senior lecturer at the department of “Design of Material Handling and Technological Equipment”, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
v.slutskov@narfu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.9.025.7

СОЗДАНИЕ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ СБОРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Е.В. Артамонов, Т.Е. Костив, М.О. Чернышов, Д.А. Русских
Тюменский индустриальный университет

Аннотация

В статье показаны результаты расчета деформаций и напряжений в режущих элементах сборных резцов, сверл и фрез. Выявлена степень влияния конструктивных параметров режущих элементов, схем установки, закрепления и базирования в корпусе инструмента, а также условий нагружения на деформации и напряжения, возникающие в сменных многогранных пластинах при резании. Также представлены конструкции разработанных и запатентованных режущих элементов высокой прочности и сборных инструментов высокой работоспособности.

Ключевые слова: сменные режущие пластины, сборные инструменты, твердые сплавы, напряжения, прочность, работоспособность.

CREATION OF CUTTING CARBIDE INSERTS OF INCREASED STRENGTH FOR ASSEMBLED TOOLS

E.V. Artamonov, T.E. Kostiv, M.O. Chernyshov, D.A. Russkikh
Tyumen Industrial University

Abstract

The article shows the results of the calculation of deformations and stresses in the cutting elements of prefabricated cutters, drills and cutters. The degree of influence of the design parameters of the cutting elements, installation schemes, fastening and basing in the tool body, as well as loading conditions on the deformations and stresses that occur in the replaceable polyhedral inserts during cutting is revealed. Designs of developed and patented high strength cutting elements and high-performance prefabricated tools are also presented.

Keywords: replaceable cutting inserts, assembled tools, hard alloys, stresses, strength, performance.

Введение

В современном производстве применение сборных инструментов со сменными многогранными пластинами из твердых сплавов показало их эффективность в сравнении с режущими инструментами с напайными пластинами. Однако одной из эксплуатационных проблем сборных инструментов является недостаточная прочность и работоспособность режущих пластин. Так, из-за низкой прочностной стойкости пластин необходимо применять более щадящие режимы обработки, либо более часто производить переналадку оборудования, что существенно снижает эффективность и увеличивает время обработки [1, 2].

По статистике, режущие пластины чаще всего выходят из строя из-за недостаточной прочности и хрупкого разрушения, в результате поломок, скалывания и выкрашивания, что представлено на *рис. 1*.

Преждевременное хрупкое разрушение сменных режущих пластин преимущественно возникает из-за повышенных температурно-силовых нагрузок, низкой прочности и износостойкости подобранного твердого сплава, геометрических и конструктивных параметров пластин, не обеспечивающих снижение напряжений растяжения и деформаций в процессе резания.

В статье [3] приведены результаты исследований влияния формы вершины ромбической пластины на её напряженное состояние и величину деформации, однако не показаны влияния других конструктивных

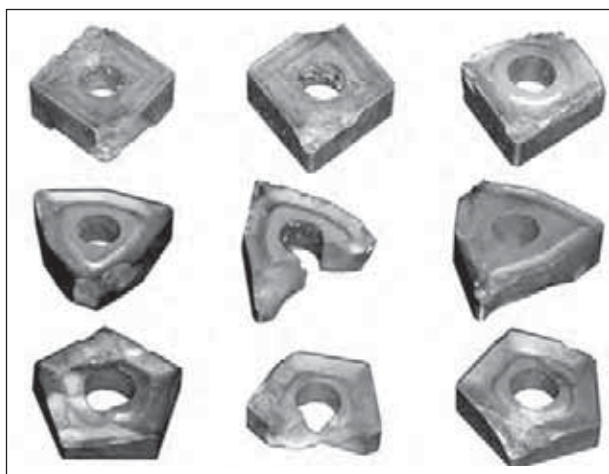


Рис. 1. Характерные виды разрушения режущих твердосплавных пластин

параметров пластин, таких как форма пластины, схема её нагружения и закрепления. В статье [4] представлены результаты испытания пластин различных форм и размеров с целью определения влияния формы пластин на их износостойкость и работоспособность, однако нет четкого объяснения причин повышения их работоспособности с позиции изменения напряжений и деформаций пластин в зависимости от их конструктивных параметров.

Таким образом, задача изучения влияния конструктивных параметров многогранных режущих пластин на напряжения и деформации с целью повышения их прочности и работоспособности сборных инструментов является актуальной.

Основная часть

В работе [5] была высказана гипотеза и приведены доказательства того, что для решения задач расчета прочности многогранных режущих пластин сборных резцов и фрез применим критерий прочности Писаренко-Лебедева, который хорошо описывает характер разрушения режущих пластин. При этом критерий прочности, описывающий такой сложный характер разрушения от хрупкого к переходному хрупко-пластическому и пластическому, можно найти путем расчета эквивалентных напряжений по формулам

$$\sigma_{\text{экв}} = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-I} \leq \sigma_B, \quad (1)$$

$$I = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (2)$$

$$\chi = \frac{\sigma_B}{\sigma_{-B}}, \quad (3)$$

где i – величина, характеризующая напряженное состояние; σ_1, σ_2 и σ_3 – главные нормальные напряжения; σ_i – интенсивность напряжений; χ – параметр характеризующий характер разрушения материала; σ_B – предел прочности на растяжение; σ_{-B} – предел прочности на сжатие; A – величина, описывающая характеристики материала ($WC-Co = 0,8$; $WC-TiC-Co = 0,7$) [5, 6].

Геометрически модель прочности по критерию Писаренко-Лебедева при χ от 0,25 до 0,75 представлена на рис. 2.

На основании анализа формул (1), (2) и (3) расчета $\sigma_{\text{экв}}$ эквивалентных напряжений и модели геометрического представления критерия прочности Писаренко-Лебедева можно сделать вывод о том, что для конструкций режущих многогранных пластин из твердых сплавов при значении величин опасных напряжений растяжения σ_1 , стремящихся к нулю, то есть для создания области всестороннего сжатия $\sigma_2 < \sigma_3 < 0$, форма пластины повышенной прочности должна описываться выпуклыми дугами предельных поверхностей.

В работах [5] и [7] были проведены исследования, определяющие влияние условий нагружения на напряжения и деформации, таких параметров

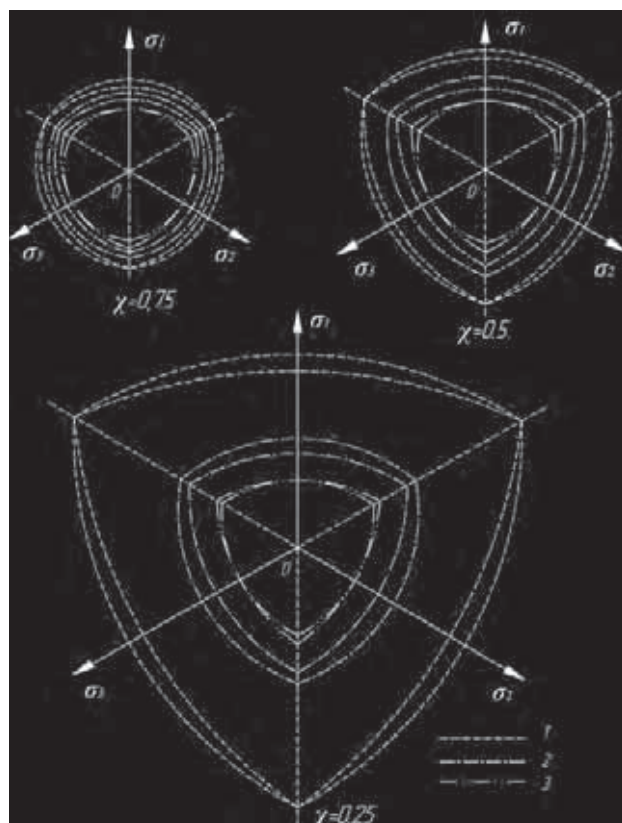


Рис. 2. Геометрическое представление модели прочности по критерию Писаренко-Лебедева

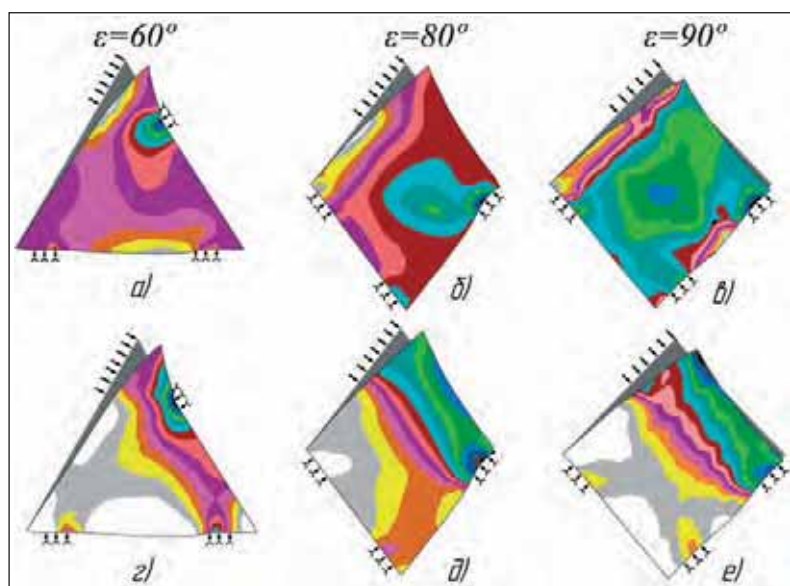


Рис. 3. Изолинии главных напряжений растяжения σ_1 и сжатия σ_2 в режущих многогранных пластинах разных форм по ГОСТ 19043-80, ГОСТ 19049-80, ГОСТ 19056-80 (при токарной обработке ХН60МВТЮ; твердый сплав ВК8; глубина резания $t = 2$ мм; подача $S = 0,34$ мм/об; скорость резания $V = 0,2$ м/с) [5, 7]:
а, б, в – σ_1 , г, д, е – σ_2 (перемещения увеличены в 3000 раз)

многогранных пластин как геометрические (форма пластины, размеры пластины), конструктивные (схемы закрепления, базирования пластин, под действием сил резания и усилий закрепления пластин для различных сборных инструментов: резцов, фрез и сверл).

На рис. 3 представлены изолинии главных напряжений растяжения σ_1 и сжатия σ_2 в режущих многогранных пластинах разных форм. В ходе анализа полученных результатов расчетов напряжений было выявлено, что зона наиболее опасных значений напряжений растяжения $\sigma_{1\max}$ находится вдоль главной режущей кромки, а напряжений сжатия $\sigma_{2\max}$ – на вспомогательной режущей кромке пластины, в независимости от её формы. Причем наиболее опасные растягивающие напряжения σ_1 возникают на расстоянии четверти длины пластины от её вершины.

Эпюры значений напряжений растяжения σ_1 , распределённых на главной режущей кромке режущих пластин разных форм, представленные на рис. 4, по-

казывают, что в зависимости от формы режущей многогранной пластины и угла ϵ изменяются значения величин растягивающих напряжений σ_1 . У круглой пластины с углом $\epsilon = 180^\circ$ растягивающие напряжения в пять раз меньше, чем у пластины, выполненной на основе равностороннего трехгранника с углом $\epsilon = 60^\circ$. Следовательно, можно сформулировать требование к новым формам режущих многогранных пластин сборных инструментов: при проектировании сменных многогранных пластин необходимо обеспечивать максимально возможное увеличение угла ϵ с целью снижения опасных величин растягивающих напряжений σ_1 и увеличения их прочности.

В соответствии с приведенным выше требованием, были разработаны и запатентованы две новые формы режущих пластин, конструктивные параметры которых позволили обеспечить их высокую прочность [8, 9].

На рис. 5а и 5б приведена пластина высокой прочности со скругленной боковой стороной, выполненной на всю длины пластины.

На рис. 5в схематично представлено первое запатентованное конструктивное исполнение режущей пластины повышенной прочности [8]. Отличительной особенностью данной пластины является форма ее боковых граней со скругленной боковой стороной, выполненной на 1/2 длины пластины

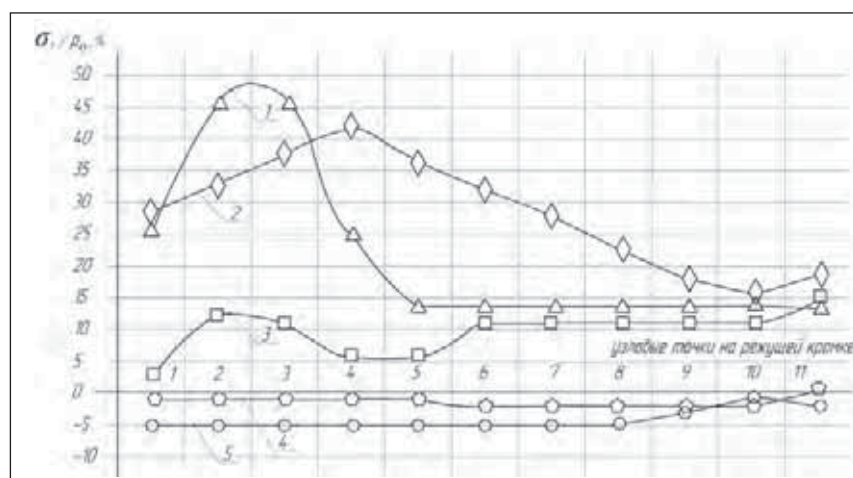


Рис. 4. Эпюры значений напряжений растяжения σ_1 распределённых на главной режущей кромке режущих пластин разных форм [5, 7]:
1 – 3-гранная ($\epsilon = 60^\circ$); 2 – ромбическая ($\epsilon = 80^\circ$); 3 – 4-гранная ($\epsilon = 90^\circ$);
4 – 5-гранная ($\epsilon = 108^\circ$); 5 – круглая ($\epsilon = 180^\circ$)

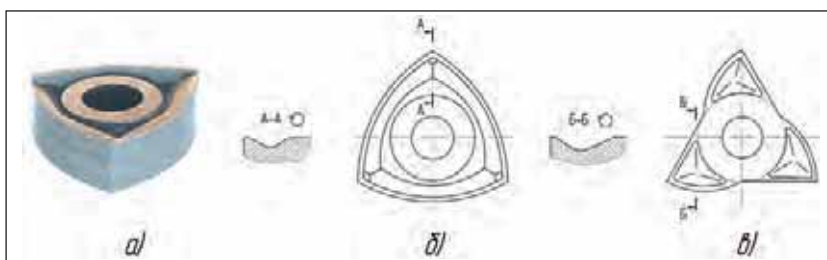


Рис. 5. Сменные пластины высокой прочности

a) и *б)* пластина высокой прочности со скругленной боковой стороной, выполненной на всю длины пластины; *в)* пластина высокой прочности со скругленной боковой стороной, выполненной на 1/2 длины пластины (Патент № 2201316)

[7, 8]. Плоские участки боковой стороны пластины позволяют обеспечить условия надежного закрепления и базирования пластины в корпусе сборного инструмента. Скругленные участки позволяют обеспечить увеличение угла ε , а следовательно, снижение опасных величин растягивающих напряжений σ_1 и увеличение их прочности.

На *рис. 6* представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния режущих пластин новых форм, в сравнении со стандартной трехгранной пластиной, в виде распределения растягивающих напряжений σ_1 на главных режущих кромках. Анализ полученных эпюр показывает, что новая форма режущей пластины с цилиндрической боковой поверхностью на половине длины пластины, обеспечивает снижение значений опасных растягивающих напряжений σ_1 по сравнению со стандартной трехгранной пластиной почти в пять раз, что можно объяснить увеличением угла ε при вершине новой формы пластины на тридцать градусов.

Второе запатентованное конструктивное исполнение режущей пластины повышенной прочности схематично представлено на *рис. 7a*. Отличительной особенностью данной пластины, выполненной на основе трехгранной пластины правильной формы, является увеличение угла ε с 60° до 90° , за счет скругленной вспомогательной режущей кромки [7, 9].

Сравнительный анализ модели имитации течения проходным упорным резцом с разными формами пластин,

который был проведен с расчетом напряжений и деформаций при помощи метода конечных элементов, показал, что скругление вспомогательной режущей кромки пластины обеспечивает значительное снижение значений опасных растягивающих напряжений σ_1 на нагруженном участке главной режущей кромки примерно в пять раз.

Таким образом, разработанные новые формы пластин обеспечивают повышение прочности путем увеличения угла ε при вершине за

счет выполнения скругленных боковых поверхностей пластин, что приводит к снижению опасных напряжений растяжения $\sigma_{1\max}$ от 2,5 до 5 раз по сравнению с прототипами стандартных пластин.

Систематизация полученных результатов позволила расставить сменные многогранные пластины существующих и новых форм в ряд по мере повышения их прочности (*рис. 8*). На основании этой схемы предложено руководствоваться следующим принципом при выборе формы пластины: при условиях обработки, для которых определяющими являются прочностные характеристики инструмента, следует выбирать пластины с большим углом ε при вершине.

На *рис. 9* представлены конструкции проходных резцов с режущими пластинами высокой прочности со скругленными боковыми сторонами, выполненными по всей и по половине длины пластины.

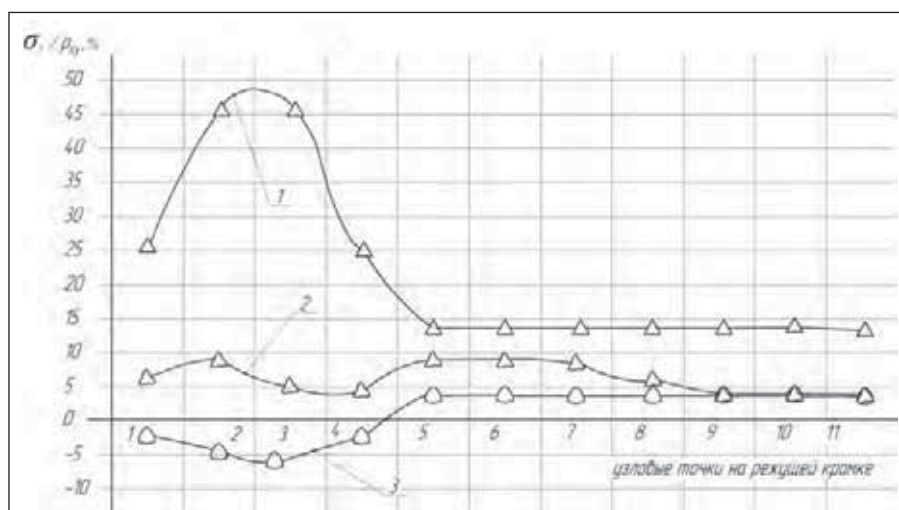


Рис. 6. Сравнение эпюр напряжений растяжения σ_1 на главных режущих кромках трехгранных многогранных пластин: 1 – с плоскими боковыми сторонами; 2 – со скругленными боковыми сторонами, выполненными на 1/2 длины пластины; 3 – со скругленными боковыми сторонами, выполненными на всю длины пластины

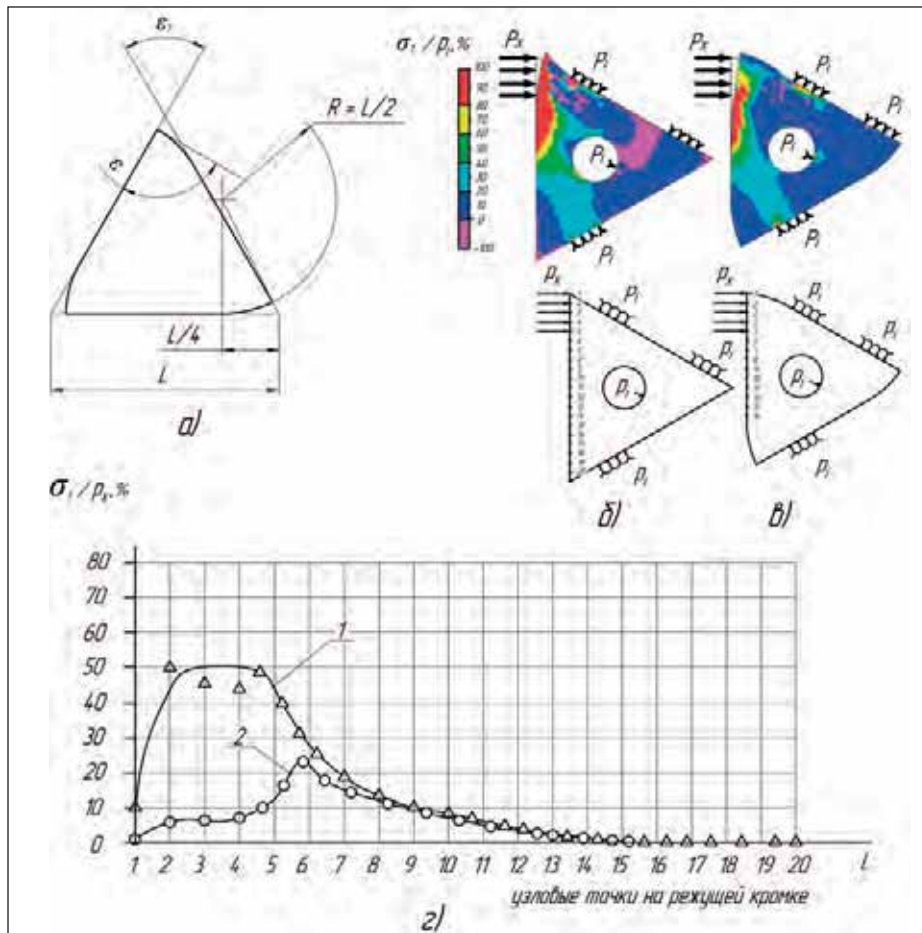


Рис. 7. Результаты сравнительного расчёта модели имитации течения проходным упорным резцом с разными формами пластин: а) конструктивное исполнение пластины высокой прочности, со скругленной вспомогательной режущей кромкой; б) и в) изолинии растягивающих напряжений σ_1 и схемы нагружения; г) распределение опасных напряжений растяжения σ_1 на главных режущих кромках пластин разных форм (1 – распределение напряжений σ_1 на режущей кромке стандартной пластины $\varepsilon = 60^\circ$; 2 – распределение напряжений σ_1 на режущей кромке пластины высокой прочности $\varepsilon = 90^\circ$)



Рис. 8. Ранжирование форм сменных режущих твердосплавных пластин по повышению прочности. Разработанные пластины высокой прочности: а) пластина высокой прочности со скругленными боковыми сторонами, выполненными на 1/2 длины пластины (Патент № 2201316); б) пластина высокой прочности со скругленными боковыми сторонами, выполненными на всю длины пластины; в) пластина высокой прочности, со скругленной вспомогательной режущей кромкой (Патент № 2531336)

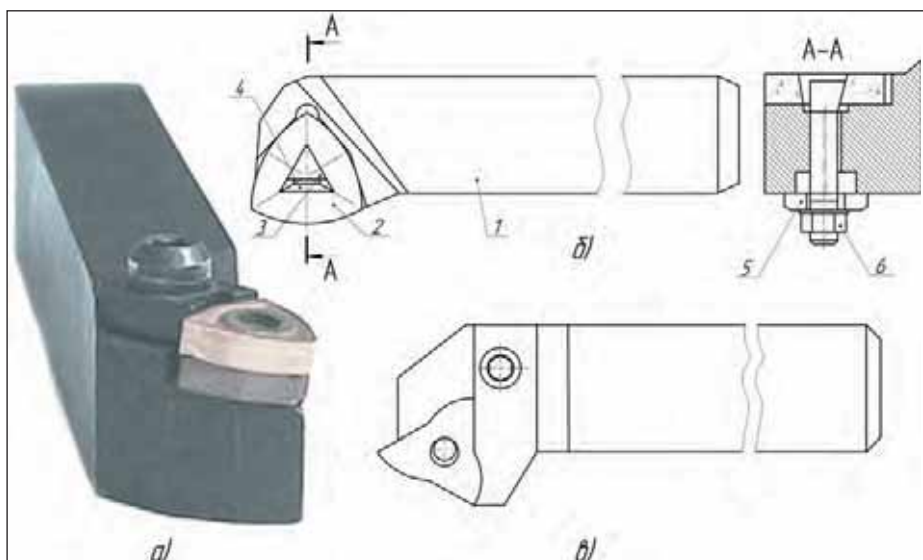


Рис. 9. Проходные резцы с режущими пластинами высокой прочности



а)



б)

Рис. 10. Разработанные конструкции сборных инструментов:

а) Пластина высокой прочности (Патент № 2531336);

б) Сборное сверло с пластинами высокой прочности (Патент № 2539255)

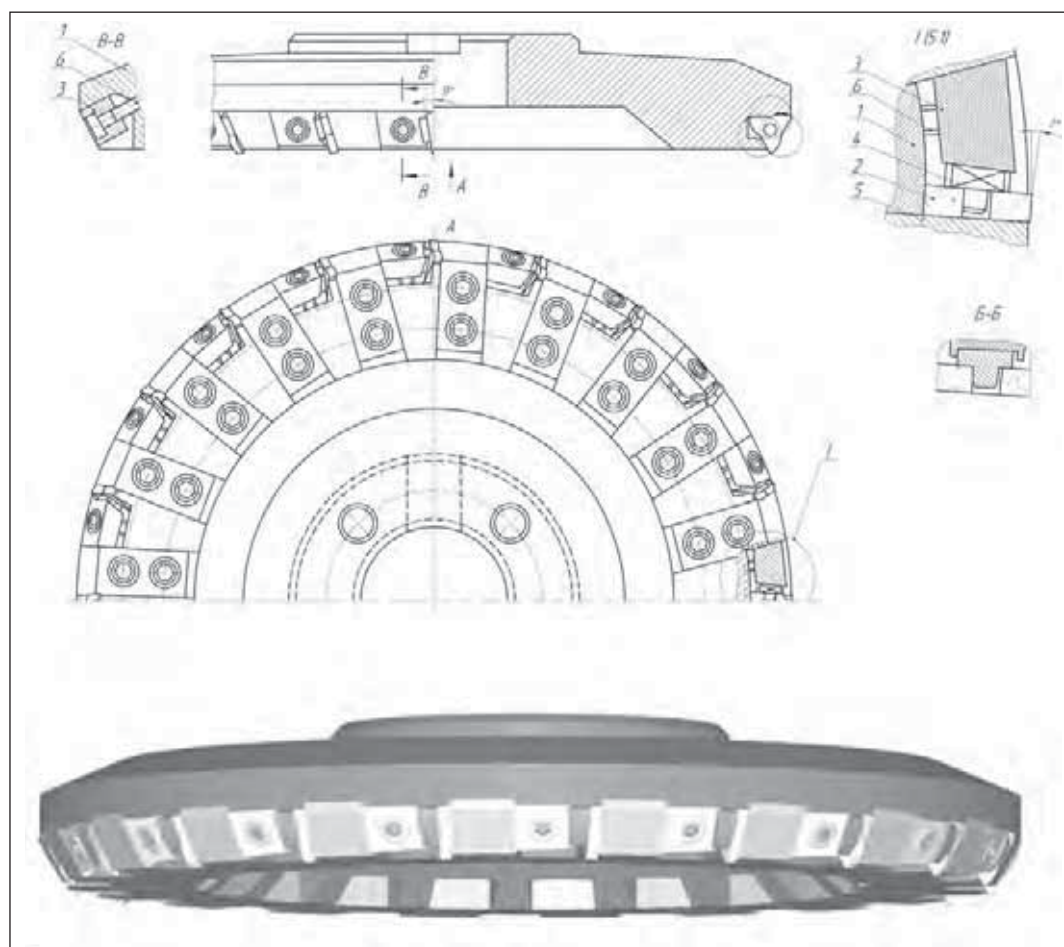


Рис. 11. Разработанная конструкция торцевой фрезы с пластинами высокой прочности

Разработанная новая форма сменной режущей пластины высокой прочности, представлена на *рис. 10а*. На *рис. 10б* представлено сборное сверло с разработанными сменными режущими элементами.

Заключение

Таким образом, доказано, что увеличение угла при вершине ε в сменных режущих твердосплавных пластинах позволяет снизить величину опасных напряжений растяжения σ_1 и соответственно повысить работоспособность режущих пластин сборных инструментов. На базе новых пластин повышенной прочности разработаны проходные резцы, отрезной резец, конструкции протяжек, торцовые фрезы с тангенциальным и фронтальным расположением пластин [5], и сборное сверло повышенной работоспособности [7].

Библиографический список

1. Васин С.А., Хлудов С.Я. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы. – М.: Машиностроение, 2006. – 352 с.
2. Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г., Седов Б.Е., Иванов В.А., Первозников В.К. Режущие инструменты. – Старый Оскол: ТНТ, 2020. – 388 с.
3. Chemezov D., Galaktionov S., Perov M., Satarin D., & Gorechnin A. (2020). Influence of the cutting part geometry on strength of the rhombic indexable insert during rough turning // ISJ Theoretical & Applied Science. 2020. Vol. 12 no. 92. P. 301–304. DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.12.92.57>
4. Shvetsov I & Mokritskij B & Malukhina O & Rahmonov A & Belyakov V. (2018). Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012052. DOI: [10.1088/1757-899X/441/1/012052](https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052)
5. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с.
6. Нгуен Мань Ха, До Ман Тунг. Расчет на прочность сменных режущих пластин при токарной обработке // Наука, техника и образование. 2021. № 2–2 (77). С. 68–76.
7. Артамонов Е.В., Чернышов М.О., Помигалова Т.Е. Повышение эффективности сборных инструментов на основе управления напряжениями в сменных твердосплавных пластинах: монография. – Тюмень: ТИУ, 2021. – 160 с.
8. Патент РФ 2201316, МПК 7 В 23 В 27/16. Режущая пластина / Артамонов Е.В., Ефимович И.А., Помигалова Т.Е. (РФ). – № 2001105806/02; Заявл. 01.03.01; Опубл. 27.03.03, Бюл. № 9.
9. Патент РФ 2531336, МПК В23В 27/16. Режущая пластина для черновой и чистовой обработки / Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Киреев В.В., Чернышов М.О. (РФ). – №2013129883; заявл. 28.06.2013; опубл. 20.10.2014; Бюл. № 29.
10. Патент РФ2539255, МПК В23В 51/00. Сборное сверло с режущими пластинами / Артамонов Е.В., Остапенко М.С., Чернышов М.О. (РФ). – № 2013155436/02; заявл. 12.12.2013; опубл. 20.01.2015; Бюл. № 2.

References

1. Vasin S.A., Khludov S.Ya. Design of replaceable polyhedral plates. Methodological principles. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 352 p.
2. Grechishnikov V.A., Grigoriev S.N., Skhirtladze A.G., Sedov B.E., Ivanov V.A., Perevnikov V.K. Cutting tools. – Stary Oskol: TNT, 2020. – 388 p.
3. Chemezov D., Galaktionov S., Perov M., Satarin D., & Gorechnin A. (2020). Influence of the cutting part geometry on strength of the rhombic indexable insert during rough turning // ISJ Theoretical & Applied Science. 2020 Vol. 12 no. 92. P. 301–304. DOI: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.12.92.57>
4. Shvetsov I & Mokritskij B & Malukhina O & Rahmonov A & Belyakov V. (2018). Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012052. DOI: [10.1088/1757-899X/441/1/012052](https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052)
5. Artamonov E.V. Strength and performance of replaceable hard-alloy plates of prefabricated cutting tools. – Tyumen: Tsogu, 2003. – 192 p.
6. Nguyen Man Ha, Do Man Tung. Calculation of the strength of replaceable cutting inserts during turning // Science, technology and education. 2021. № 2–2 (77). pp. 68–76.
7. Artamonov E.V., Chernyshov M.O., Pomigalova T.E. Improving the efficiency of prefabricated tools on the basis of stress control in replaceable hard-alloy plates: monograph. – Tyumen: TIU, 2021. – 160 p.
8. Patent RU 2201316, Int. Cl. B23B 27/16. Cutting tip / Artamonov E.V., Efimovich I.A., Pomigalova T.E. (RU). – № 2001105806/02; Appl. 01.03.01; Publ. 03.27.03, Bull. № 9.

9. Patent RU 2531336, Int. Cl. B23B 27/16. Cutting plate for rough and finish processing / Artamonov E.V., Vasiliev D.V., Kireev V.V., Chernyshov M.O. (RU). – № 2013129883; Appl. 06.28.2013; Publ. 10.20.2014; Bull. № 29.

10. Patent RU 2539255, Int. Cl. B23B 51/00. Drill assembly with cutting plates / Artamonov E.V., Ostapenko M.S., Chernyshov M.O. (RU). – № 2013155436/02; Appl. 12.12.2013; Publ. 01.20.2015; Bull. № 2.

Артамонов Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станки и инструменты», Тюменский индустриальный университет
evgart2014@mail.ru

Костив Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная механика», Тюменский индустриальный университет
kostivte@tyuiu.ru

Чернышов Михаил Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет
gegrbt2020@mail.ru

Русских Дмитрий Александрович – ассистент кафедры «Автомобильный транспорт, строительные и дорожные машины», Тюменский индустриальный университет
russkihda@tyuiu.ru

Artamonov Evgeniy Vladimirovich – D.Sc. of Engineering, Full Professor, Head of the department of “Machines and tools”, Tyumen Industrial University
evgart2014@mail.ru

Kostiv Tatyana Evgenievna – candidate Sc. of Engineering, docent, associate professor at the department of “Applied Mechanics”, Tyumen Industrial University
tatyana_pomigalova@mail.ru

Chernyshov Mikhail Olegovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University
gegrbt2020@mail.ru

Russkikh Dmitry Alexandrovich – assistant at the department of “Road Transport, Construction and Road Machinery”, Tyumen Industrial University
russkihda@tyuiu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

2.5.6. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.923.9

КОНТАКТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛАТУННЫХ СПЛАВОВ

П.А. Иванов, В.А. Левко, О.В. Литовка, Л.П. Сысоева
Сибирский государственный университет науки
и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

Аннотация

Проведенный анализ контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов показал, что они меняют свой характер в ходе обработки. Эти изменения происходят как на уровне впадин и выступов профиля шероховатости поверхности, так и на уровне абразивного зерна в целом и его отдельных микровыступов. В ходе экспериментальных исследований обработки абразивным потоком образцов из полос латуни ЛС59-1 удалось существенно уменьшить как высотные параметры, так и глубинные параметры шероховатости поверхностного слоя образца. Увеличение микротвердости поверхности образца, подтверждённое металлографическими исследованиями, показало, что обработку абразивным потоком можно отнести к отделочно-упрочняющим технологиям. Обработка абразивным потоком внутренних поверхностей латунных заготовок с нелинейной осью позволит существенно уменьшить коэффициент затухания волны в передающих системах.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, шероховатость, микротвердость, контактные взаимодействия, латунь.

BRASS ALLOY WORKPIECES CONTACT INERATIONS UNDER ABRASIVE FLOW MACHINING OF THE INNER SURFACE

P.A. Ivanov, V.A. Levko, O.V. Litovka, L.P. Sysoeva
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

Abstract

The analysis of contact interactions during under abrasive flow machining of the inner surface of workpieces made of brass alloys with a showed that they change their character during machining. These changes occur both at the level of depressions and protrusions of the surface roughness profile, and at the level of the abrasive grain as a whole and its individual microprotrusions. In the course of experimental studies of abrasive flow machining of samples from LS59-1 brass strips, it was possible to significantly decrease both the height parameters and the depth parameters of the roughness of the surface layer of the sample. An increase in the microhardness of the sample surface, confirmed by metallographic studies, showed that abrasive flow machining can be attributed to finishing and hardening technologies. Machining the inner surfaces of brass billets with a non-linear axis with an abrasive flow will significantly reduce the attenuation coefficient of the wave in transmission systems.

Keywords: abrasive flow machining, roughness, microhardness, contact interaction, brass.

Введение

Благодаря своим свойствам латуни (медно-цинковые сплавы) находят широкое применение в машиностроительных, космических отраслях при производстве сложных конструкций. Детали, изготовленные из латунных заготовок, практически не подвержены коррозии и химически инертны. Поэтому их применяют в ответственных изделиях, к которым предъявляются высокие требования, в том числе, и по качеству поверхностного слоя. Механическая обработка латунных заготовок имеет свою специфику. Так высокая пластичность латуни обуславливает ее склонность к адгезии к кромкам режущего инструмента. Высокая склонность к налипанию может привести к выкрашиванию режущей кромки и ухудшению качества обрабатываемой детали [1].

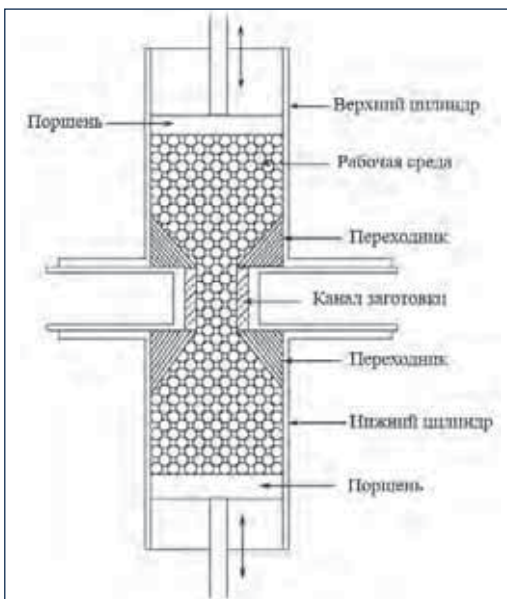
В ряде случаев в латунь добавляют легирующие элементы – свинец и кремний. Свинец улучшает обрабатываемость латуни, повышая показатель стружкодробления и уменьшая износ инструмента, что позволяет применять более производительные режимы резания. Отмечено, что по сравнению со свинцовой латунью ЛС59-1, при резании безсвинцовой латуни Л63 образовывалась более длинная стружка, наблюдались большие силы резания и температуры, что вызывало более высокий абразивный и адгезионный износ режущего инструмента [2].

Легированная кремнием латунь ЛОК59-1-0,3 продемонстрировала улучшенную обрабатываемость с точки зрения разрушения стружки и меньшей термомеханической нагрузки на инструмент, однако при

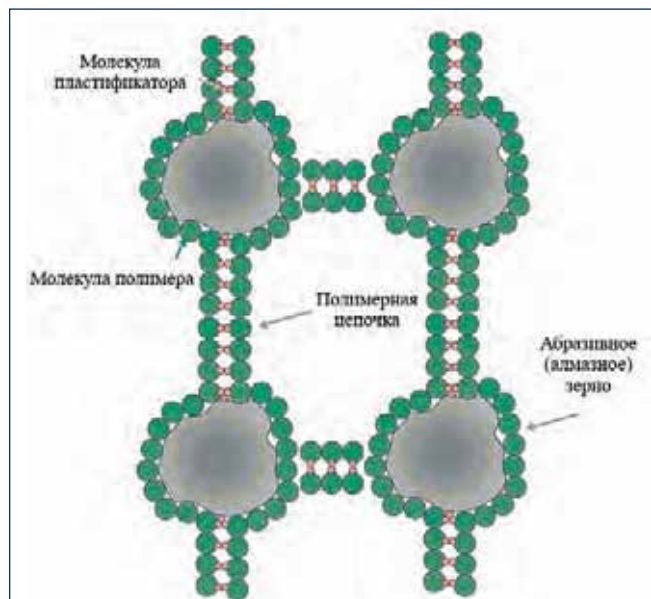
этом наблюдался более высокий износ по задней поверхности инструмента, вызванный наличием в этой латуни абразивной фазы [3]. Исследования токарной обработки свинцовой латуни, с учетом влияния частоты вращения, подачи и глубины резания при продольном точении образца показали, что этот вид обработки позволил получить шероховатость поверхности $min Ra = 1,44$ мкм. Установлено, что при этом преобладающее влияние на силы резания оказывает именно глубина резания. Ее вклад составляет 73,61 % [4].

Экспериментальное фрезерование наружной поверхности латунной заготовки (60% меди и 40% цинка) без применения охлаждающей жидкости обеспечило высокое качество поверхности $Ra = 0,6$ мкм. При этом увеличение скорости вело к уменьшению шероховатости поверхности, а увеличение подачи – к увеличению шероховатости поверхности. При этом глубина резания оказала незначительное влияние на шероховатость поверхности [5].

Для ряда ответственных деталей из латунных сплавов, например, изогнутых в нескольких плоскостях заготовок прямоугольного сечения, целесообразно применение финишной обработки (ФО) их внутреннего канала. Для полировки деталей из латунных сплавов чаще всего применяют электрохимическую обработку (ЭХО). При ЭХО внутренних поверхностей в канал необходимо помещать профильный катод. При этом величина и постоянство межэлектродного зазора, а также гидродинамические процессы, возникающие при прокачке электролита в изогнутых заготовках, негативно влияют на равномерность обработки на прямых и изогнутых участках трубы.



а



б

Рис. 1. Схема процесса двунаправленной обработки абразивным потоком:

а – схема процесса; б – схема рабочей среды

Окончательная обработка подобных заготовок традиционными способами ФО имеет сложности, связанные с затрудненным доступом инструмента к обрабатываемой поверхности. Поэтому для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки. В качестве инструмента в этих методах применяется поток разнообразных жидкостно-уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями [6].

Анализ существующих технологий ФО нетрадиционными методами показал, что для заготовок с нелинейной осью наибольшие перспективы представляют: гидроабразивная обработка; магнитно-реологическая обработка; обработка абразивным потоком. Обработка абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*) в нашей стране известна еще как абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование. Известно, что при гидроабразивной обработке внутренней поверхности изогнутых участков заготовок характерна неравномерность обработки, а при магнитно-реологической обработке обязательным условием является наложение магнитного поля, однородного для всех участков заготовок [7].

При обработке абразивным потоком, поток вязкоупругой рабочей среды, с одной стороны, полностью копирует форму поперечного сечения по всей длине обрабатываемого канала, с другой стороны – за счет вязкоупругих свойств обеспечивает оптимальное сочетание скорости потока и его давления на внутреннюю стенку обрабатываемого канала. Рабочая среда при *AFM* наполнена мелкодисперсными абразивными или алмазными частицами, микронеровности которых вступают в контактные взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. На *рис. 1* показана схема процесса двунаправленной обработки абразивным потоком.

Анализ публикаций показал, что в настоящее время механизм удаления материала при *AFM* латунных деталей описан недостаточно. Целью данного исследования является обоснование применения обработки абразивным потоком рабочими средами средней вязкости для повышения производительности и обеспечения равномерности обработки с обеспечением требуемых величин шероховатости и микротвердости внутренних поверхностей деталей из латуни. Обоснование основано на анализе контактных взаимодействий между микровыступами абразивных (алмазных) зерен и обрабатываемой поверхности.

Особенности контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком заготовок из латуни

Обзор подходов к описанию контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком приведен в ряде российских и зарубежных исследований [8, 9]. Так изучение воздействия *AFM* на различные обработанные поверхности [10], показало сходство данной технологии с шлифованием, а именно, в обоих процессах абразивные зерна распределяются случайным образом, а глубина проникновения в слой металла абразива мала. Однако в случае шлифования абразивные частицы жестко удерживаются твердым связующим материалом, тогда как при *AFM* абразивные зерна наполняют полимерную основу, которая при приложении к ней сдвигающего напряжения образует в обрабатываемом канале поток рабочей среды.

Наряду с геометрическими характеристиками обрабатываемого канала и микрогеометрией поверхностного слоя, физико-механические характеристики материалов контактирующих тел также влияют на вид контакта. При этом для абразивного зерна при *AFM* наиболее характерным является пластический контакт, обусловленный свойствами полимерной основы рабочей среды. В свою очередь, микронеровность обрабатываемой поверхности на различных уровнях контакта может испытывать упругие, упруго-пластические, пластические деформации или будет наблюдаться ее микрорезание или пластическое отеснение [11].

Ранее для анализа контактных взаимодействий при *AFM* предложено два уточнения общей схемы контакта, универсальных относительно любого вида материала [12]. Первое уточнение связано с масштабным коэффициентом, так как контакт «микронеровность заготовки – абразивное зерно» происходит как на уровне абразивного зерна в целом, так и ее отдельных микровыступов (режущих кромок). Второе уточнение обусловлено вязкостью рабочей среды. Экспериментальное исследование процесса *AFM* высокой вязкости установило, что сила резания единичным абразивным зерном, определяемая как сумма радиальной и тангенциальной (осевой) составляющих, наиболее чувствительна к изменению величины давления экструзии [12]. Отмечено, что увеличение давления экструзии и вязкости рабочей среды увеличивает радиальную составляющую силы резания и уменьшает

тангенциальную (осевую) составляющую силы резания единичным зерном [13]. Этот факт влияет на величину и направление результирующей силы резания.

Единичное абразивное зерно при *AFM* представляет собой многогранный инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твердости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое оттеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации [12]. Моделирование и экспериментальная обработка *AFM* внутренней поверхности заготовок некруглого сечения показали, что при небольших скоростях сдвига (до 0,02 м/с) численные значения напряжений потока рабочей среды могут достигать величин порядка $3 \cdot 10^6$ Па [14].

Отмечено, что при обработке абразивным потоком латунных сплавов основным механизмом удаления материала является микрорезание, а при обработке алюминиевых сплавов – пластическое оттеснение. При этом для алюминиевых сплавов значительное улучшение шероховатости поверхности происходит во время начальных циклов, в то время как для латуни уменьшение шероховатости происходит постепенно, по мере увеличения количества циклов [15]. Для *AFM* латунных сплавов выявлено, что при невысокой склонности материала к пластической деформации и пластическому оттеснению, наблюдается хорошая способность к упрочнению [16].

Экспериментальные исследования обработки абразивным потоком латунных заготовок

Для анализа специфики контактных взаимодействий при *AFM* заготовок из латунных сплавов проведен ряд экспериментальных исследований.

В ходе исследований процесса абразивно-экструзионной обработки внутренней поверхности прямоугольных заготовок были установлены оптимальные технологические режимы *AFM* и составы рабочей среды, при которых была достигнута шероховатость $Ra = 0,2$ мкм [17].

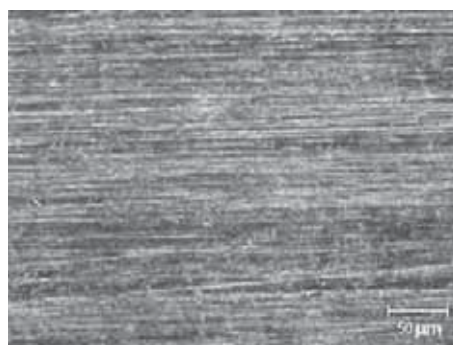
Эти режимы были выбраны для проведения дополнительных исследований с применением той же методики. Образцы из холоднокатанной полосы латунного сплава ЛС59-1 в мягком состоянии длиной 80 мм (рис. 2) были обработаны абразивным потоком 20 циклами в течение 5 минут. В качестве наполнителя рабочей среды использован электрокорунд белый, зернистостью $Ba = 250$ мкм, процентным весовым содержанием $Ka = 50$ %. Величина сдвигающего давления $P_{вх} = 10$ МПа. Качественная оценка состояния поверхностного слоя заготовки при *AFM* проведена по изображениям до (рис. 3а) и после обработки (рис. 3б), полученным под микроскопом при увеличении в 125 раз, количественная оценка – на основе профилограмм, выполненных на профилометре модели *MarSurf M300*. Протоколы профилограмм состояния поверхности образцов до и после *AFM* показаны на рис. 4 и 5 соответственно. Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя латунной заготовки до и после обработки по протоколам профилограмм приведена в Таблице.



Рис. 2. Образец из полосы латунного сплава ЛС59-1 после *AFM*



а



б

Рис. 3. Состояние поверхности латунного образца (увеличение в 125 раз):
а – исходное состояние; б – состояние после обработки

Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя латунной заготовки до и после обработки по протоколам профилограмм

Наименование параметров шероховатости	Численное значение параметров	
	до обработки	после обработки
Средняя арифметическая шероховатость, Ra , мкм	1,482	0,166
Среднеквадратическая шероховатость, Rq , мкм	1,877	0,405
Средняя высота неровности, Rz , мкм	8,545	2,544
Средняя высота элементов профиля, RzJ , мкм	5,092	1,637
Максимальная высота шероховатости, $Rmax$, мкм	10,44	7,984
Средняя высота выступов профиля, Rp , мкм	4,191	1,006
Максимальная высота выступов профиля, Rpa , мкм	5,652	3,290
Средняя высота выступов профиля, Rpm , мкм	4,191	1,538
Средняя глубина впадин профиля, Rv , мкм	4,354	1,198
Асимметричность профиля, Rsk	0,376	-2,73
Среднее расстояние между локальными выступами профиля, S , мкм	75	149
Сокращенная высота выступов, Rpk , мкм	2,183	0,558
Глубина шероховатости сердцевин, Rk , мкм	5,013	0,370
Среднеарифметическая высота неровностей профиля, вычисляемая по каждому третьему выступу, $R3z$, мкм	5,036	0,501
Средняя ширина элементов профиля, Rsm , мкм	213	698
Суммарная высота Rt R профиля, мкм	11,47	7,984
Диапазон выступов профиля $A1$, мкм ² /мм	106,2	31,88
Диапазон впадин профиля $A2$, мкм ² /мм	69,82	37,43
Маслоудерживающий объем $V0$, мм ³ /мм ²	0,007	0,004
Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости; $Mr1$, %	9,7	11
Материальная составляющая, определяется для линии разреза, которая отделяет глубокие впадины от основного профиля шероховатости; $Mr2$, %	93	91

Сплав ЛС59-1 является многокомпонентным медным сплавом (57–60 % меди, 37,05–42,2 % цинка, 0,8–1,9 % свинца, примеси не более 0,75 %). В его микроструктуре наряду с основными фазами содержатся частицы свободного свинца (1–2 об. %), которые локализуются главным образом на границах зерен или в междендритных областях, так как свинец практически нерастворим в твердой меди и всегда присутствует в литых и деформируемых материалах в виде темных вкраплений овальной формы [18].

На изображении исходного состояния образца (рис. 3а) эти вкрапления наблюдаются по всей поверхности. Шероховатость поверхностного слоя имеет величину $Ra = 1,25 \dots 1,5$ мкм и произвольное направление. На поверхности присутствуют такие дефекты, как вмятины и раковины, протяженностью 20...500 мкм, а также задиры и риски шириной 3...15 мкм.

Структура поверхностного слоя образца после АФМ существенно изменилась (рис. 3б). Она стала однородной по всей длине образца. Раковины, вмятины и задиры отсутствуют. Видны темные вкрапле-

ния свинца, однако следы шаржирования частичками абразивных зерен отсутствуют. Шероховатость поверхности приобрела параллельное направление, которое совпадает с направлением потока рабочей среды, структура представлена комплексом рисок шириной 1...10 мкм и длиной от 100 мкм. Величина снятого слоя металла в ходе обработки составила 100...130 мкм.

Сравнение двух полученных профилограмм показывает, что в результате АФМ существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние – Ra , Rz , Rq , RzJ , Rp , Rpk , Rpa ; максимальные – $Rmax$, Rpm , и $R3z$; суммарные – Rt), так и глубинные параметры шероховатости (Rv и Rk). Изменился и профиль шероховатости. Так среднее расстояние между локальными выступами профиля S увеличилось от 75 до 149 мкм, а средняя ширина элементов профиля Rsm , возросла от 213 до 698 мкм. При этом измеренный диапазон выступов профиля $A1$, уменьшился от 106,2 до 31,88 мкм²/мм, а диапазон впадин профиля $A2$ уменьшился с 69,82 до 37,43 мкм²/мм. Показатель асимметричности



Рис. 4. Протокол профилограммы необработанной поверхности

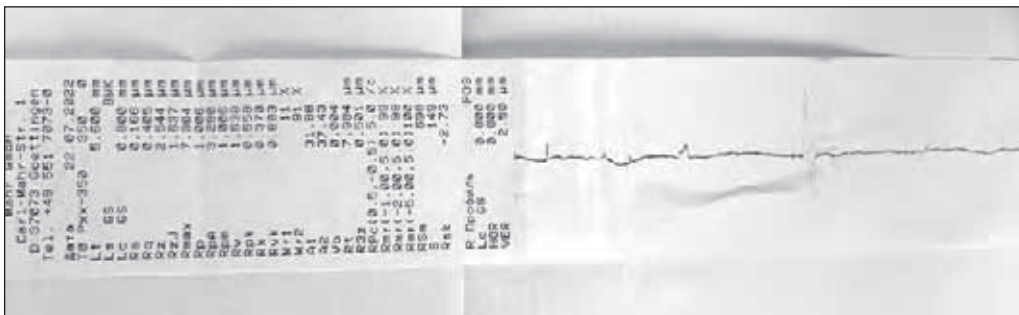


Рис. 5. Протокол профилограммы обработанной поверхности

профиля шероховатости Rsk изменил не только величину, но и знак от 0,376 до $-2,73$.

Для оценки твердости поверхности образца и ее изменения в процессе обработки проведен ряд измерений. Эти измерения осуществлялись по методу Виккерса путем вдавливания алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями 136° в образец под действием нагрузки 100 г и 20 г, приложенной в течение 10 секунд и измерения диагоналей отпечатка, остав-

шегося на поверхности после снятия нагрузки на приборе *EMCOTEST* в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 9450-76 (рис. 6).

Согласно ГОСТ 2208-2007 твердость поверхности холоднокатанных листов из латуни ЛС59-1 в мягком состоянии должна быть не менее 105 HV.

На рис. 7 приведен график зависимости микротвердости HV поверхности латунного образца по его длине до и после *AFM*. Установлено, что микротвердость поверхности образца до обработки варьировалась в пределах от 90 до 110 HV (85 %... 105 %

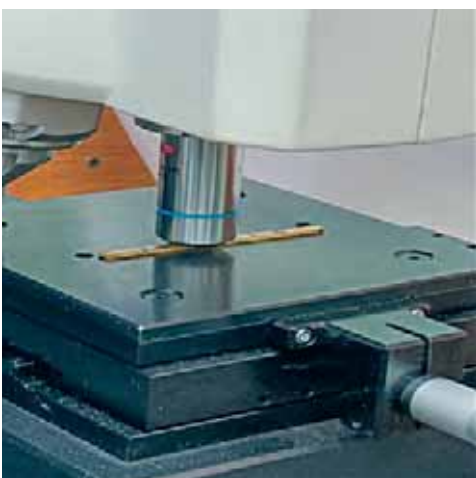


Рис. 6. Процесс измерения микротвердости образца из полосы латуни

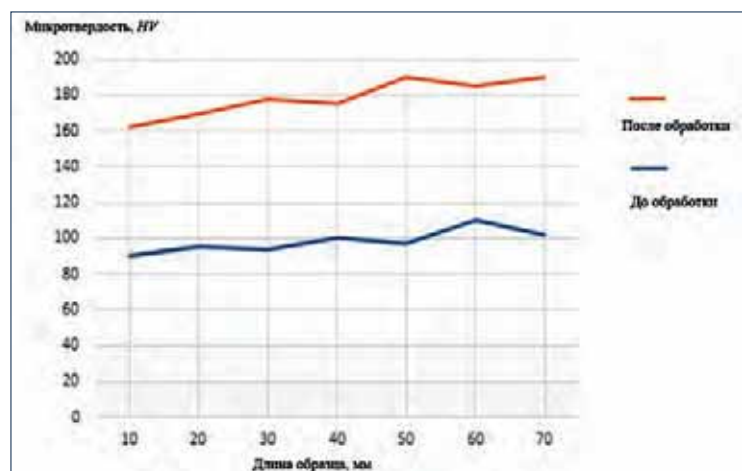


Рис. 7. Зависимость распределения микротвердости HV поверхностного слоя по длине латунного образца до и после обработки абразивным потоком

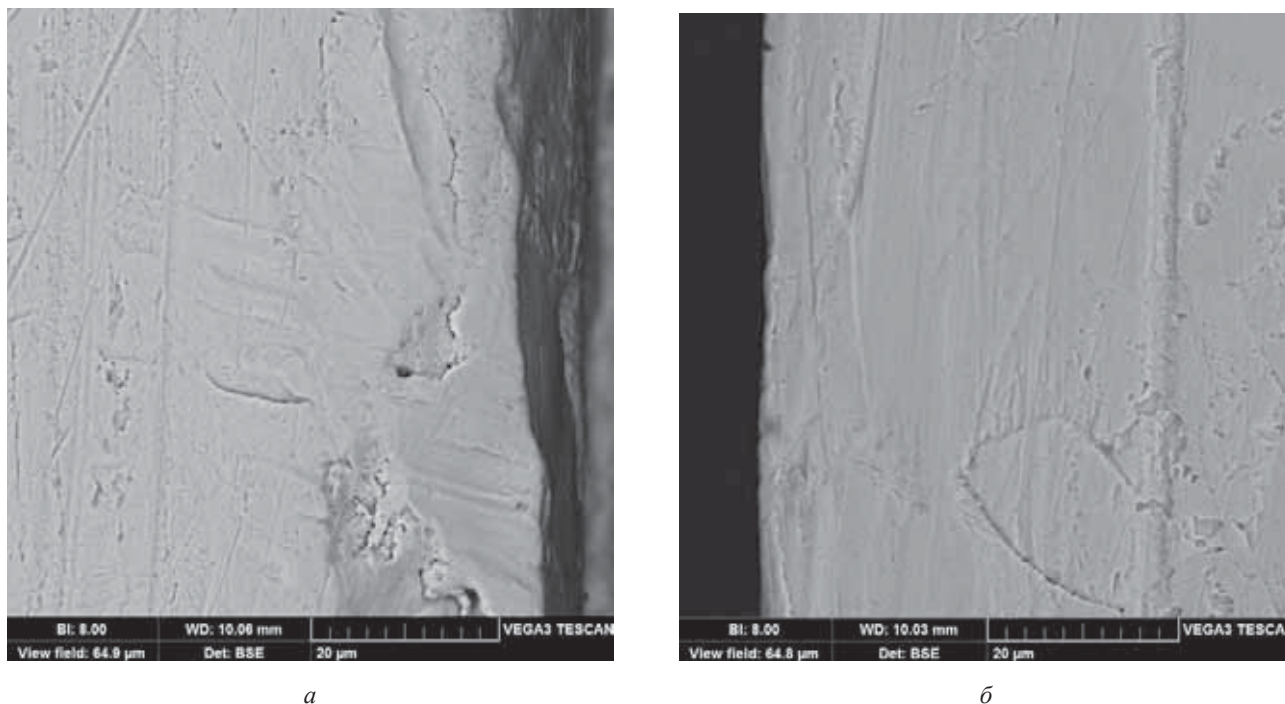


Рис. 8. Шлиф латунного образца (изображение на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3):
a – до обработки; *б* – после обработки



Рис. 9. Шлиф латунного образца после обработки (изображение на микроскопе Olympus GX 41)

от требуемой). После обработки абразивным потоком микротвердость увеличилась до 160...190 HV, т.е. стала больше на 56...57 %.

Визуальный осмотр абразивных зерен рабочей среды после обработки латунного образца не выявил налипания латунных частиц к краям абразивного зерна.

Металлографические исследования шлифов образцов до (рис. 8а) и после (рис. 8б) AFM на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 подтвердили показания профилограмм о существенном изменении структуры поверхностного слоя. Наличие упроченного слоя по данным изображениям установить не удалось.

Однако дополнительное рассмотрение шлифа образца после обработки в отраженном свете на микроскопе *Olimpus GX 41* (рис. 9) показало наличие некоторых изменений в подповерхностном слое. Здесь микроструктура шлифа латунного образца представлена светлыми участками α -фазы и темными включениями твердой β -фазы.

Повышенное содержание темных включений твердой β -фазы характерно для поверхностного слоя. В основном слое образца преобладают светлые участки α -фазы.

Обсуждение результатов исследования

Для расчета сил, возникающих при контактных взаимодействиях, необходимо знать численные значения нормальных напряжений σ и касательных напряжений τ , возникающих в потоке рабочей среды. Эти значения в случае обработки абразивным потоком высоковязкой рабочей средой могут достигать показателей до 0,2...0,3 МПа. Составляющие силы резания P_z и P_y , создаваемые при таких напряжения абразивным зерном величиной 250 мкм, будут варьироваться в интервале от 1,3 Н до 1,5 Н.

При таких величинах составляющих сил резания, на начальной стадии обработки на уровне выступов профиля и опорной кривой профиля шероховатости преобладают механизмы контакта в виде микрорезания и пластического оттеснения как на уровне микровыступов, так и абразивного зерна в целом. На уровне впадин профиля происходит процесс пластической деформации оснований выступов профиля шероховатости. При этом происходит упрочнение подповерхностного слоя. В результате массового контакта абразивных зерен (микро)валики, образующиеся в процессе пластического оттеснения по обеим сторонам от (микро)царапины, также удаляются, как и микростружка.

По мере удаления максимальных выступов профиля шероховатости увеличивается суммарная площадь сечения микронеровности плоскости контакта «зерно – поверхность» относительно опорной кривой профиля поверхности. Плотность снимаемого слоя также становится больше. Условия контакта изменяются. На следующую стадию процесс *AFM* переходит, когда величина снятого слоя материала превысит глубину первоначальных дефектов поверхности – вмятин, раковин и задиры. Микрорезание и пластическое оттеснение остаются только на уровне контакта микровыступов абразивного зерна. На уровне абразивного зерна в целом реализуется только

пластическое деформирование профиля обрабатываемой поверхности.

На завершающей стадии обработки достигается равновесное состояние контакта потока рабочей среды и поверхностного слоя образца, при котором абразивное зерно в целом взаимодействует с обрабатываемой поверхностью в условиях упругого контакта, а микрорезание, пластическое оттеснение и пластические деформации осуществляются на уровне микровыступов абразивного зерна. Это предположение подтверждается глубиной и шириной рисок на обработанной поверхности (рис. 3б).

Шероховатость поверхности принимает параллельное направление. Пластическая деформация в ходе обработки ведет к деформационному упрочнению приповерхностной области и появлению остаточных сжимающих напряжений.

Проведенные металлографические исследования позволили выявить в поверхностном слое преобладание темных включений твердой β -фазы, по сравнению с доминированием светлых участков α -фазы основного слоя металла.

Заключение

Экспериментальные исследования обработки абразивным потоком образцов из полос латуни ЛС59-1 показали, что структура поверхностного слоя в ходе обработки существенно изменилась. В ходе обработки удалены такие исходные дефекты как вмятины и раковины, протяженностью 20...500 мкм, а также задиры и риски шириной 3...15 мкм. Шероховатость поверхностного слоя изменила свое направление с произвольного на параллельное, которое совпало с направлением потока рабочей среды. Величина снятого слоя металла в ходе обработки составила 100...130 мкм.

Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов меняют свой характер. На начальной стадии обработки на уровне выступов профиля и опорной кривой профиля шероховатости преобладают механизмы контакта в виде микрорезания и пластического оттеснения как на уровне микровыступов, так и абразивного зерна в целом. На уровне впадин профиля происходит процесс пластической деформации оснований выступов профиля шероховатости. На следующую стадию процесс обработки абразивным потоком переходит, когда величина снятого слоя материала превысит глубину первоначальных дефектов поверхности – вмятин, раковин и задиры. Микрорезание и пластическое оттеснение

остаются только на уровне контакта микровыступов абразивного зерна. На уровне абразивного зерна в целом реализуется только пластическое деформирование профиля обрабатываемой поверхности. На завершающей стадии обработки наступает равновесное состояние при контакте, при котором абразивное зерно в целом взаимодействует с обрабатываемой поверхностью в условиях упругого контакта, а микрорезание, пластическое отгеснение и пластические деформации осуществляются на уровне микровыступов абразивного зерна.

В результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры, так и глубинные параметры шероховатости поверхностного слоя образца: Ra с 1,482 мкм до 0,166 мкм; Rpm с 4,191 мкм до 1,538 мкм; Rv с 4,354 мкм до 1,198 мкм.

Проведенные металлографические исследования, а также характер изменения профиля шероховатости (S от 75 до 149 мкм; Rsm от 213 до 698 мкм) и увеличение микротвердости поверхности образца (от 90...110 HV до 160...190 HV) показывают, что обработку абразивным потоком латунных заготовок можно отнести к отделочно-упрочняющим технологиям.

Обработка абразивным потоком внутренних поверхностей латунных заготовок с нелинейной осью позволит существенно уменьшить коэффициент затухания волны в передающих системах.

Библиографический список

1. Johansson J., Persson H., Ståhl J.E., Zhou J.M., Bushlya V., & Schultheiss F. (2020). Machinability evaluation of low-lead brass alloys. *Procedia Manufacturing*, 38, 1723–1730. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.102>
2. On the function of lead (Pb) in machining brass alloys. J. Johansson, Per Alm, Rachid M'Saoubi, Per Malmberg, Jan-Eric-Stahl, Volodymyr Bushlya. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2022) 120:7263–7275. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09205-0>
3. N. Gane, The effect of lead on the friction and machining of brass, *Philosophical Magazine A*, 43 (1981) 545–566.
4. Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy. Nikolaos M. Vaxevanidis, N.A. Fountas, A. Koutsomichalis, John D. Kechagias. Article in *Procedia Structural Integrity*. September 2018. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.09.046.
5. Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of machined brass (60/40) in CNC end milling – ANFIS modeling. Ibrahim Maher, Ahmed A. D. Sarhan, Mohamed Eltaib Kafrelsheikh. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. September 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-6016-z.
6. Иванов П.А. Особенности существующих методов финишной обработки внутренних каналов / Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс]: материалы VII Межд. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (12–16 апреля 2021 г.) В 3 т. Т. 1. С. 30–32.
7. Иванов П.А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения / П.А. Иванов, В.А. Левко // *Металлообработка*. – 2021. – № 4 (124). – С. 11–19. – DOI 10.25960/mo.2021.4.11. – EDN MAATAT.
8. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. Issue 1–4. P. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>
9. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining / V.A. Levko, O.V. Litovka, D.I. Savin, N.S. Terjaev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года*. Vol. Volume 1155. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029. – EDN CGFFUG.
10. T.R. Loveless, R.E. Williams, K.P. Rajurkar. A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* 47, (1994) P. 133–151. DOI 10.1016/0924-0136(94)90091-4
11. Левко В.А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке / В.А. Левко // *Металлообработка*. – 2008. – № 3 (45). – С. 19–23. – EDN JWWHR.
12. Левко В.А. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена / В.А. Левко, Д.И. Савин, О.В. Литовка // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 1 (150). – С. 36–51. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51. – EDN ООСРКИ.
13. Zhang Ke Hua, Ding Jin Fu, Xu Yong Chao. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // *Advanced Materials Research*, 2013. Vol. 797. P. 390–395. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390>

14. Иванов П.А., Левко В.А., Литовка О.В. Моделирование и экспериментальная обработка обработки абразивным потоком внутренней поверхности заготовок некруглого сечения. *Металлообработка*, 2022, № 3, С. 24–34. DOI 10.25960/mo.2022.3.24

15. S. Singh, H.S. Shan, P. Kumar. Wear behavior of materials in magnetically assisted abrasive flow machining. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 128, Issues 1–3, 2022. P. 155–161. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00442-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00442-9)

16. S. Singh, H.S. Shan, P. Kumar. Experimental Studies on Mechanism of Material Removal in Abrasive Flow Machining Process. *Journal of Materials and Manufacturing Processes* Volume 23, Issue 7, 2008. P. 714–718. DOI: 10.1080/10426910802317110

17. Левко В.А. Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей / В.А. Левко. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2015. – 222 с. – ISBN 978-5-86433-654-0. – EDN RQDICO.

18. Ткачук Г.А., Мальцев В.А., Чикова О.А. Изучение микроструктуры и механических свойств в субмикрообъемах латуни ЛС59-1А. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. №. 4. С. 40–47. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-40-47](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-40-47)

References

1. Johansson, J., Persson, H., Ståhl, J.E., Zhou, J.M., Bushlya, V., & Schultheiss, F. (2020). Machinability evaluation of low-lead brass alloys. *Procedia Manufacturing*, 38, 1723–1730. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.102>

2. On the function of lead (Pb) in machining brass alloys. J. Johansson, Per Alm, Rachid M'Saoubi, Per Malmberg, Jan-Eric-Stahl, Volodymyr Bushlya. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2022) 120:7263–7275. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09205-0>

3. N. Gane, The effect of lead on the friction and machining of brass, *Philosophical Magazine A*, 43 (1981) 545–566.

4. Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy. Nikolaos M. Vaxevanidis, N.A. Fountas, A. Koutsomichalis, John D. Kechagias. Article in *Procedia Structural Integrity* · September 2018 DOI: 10.1016/j.prostr.2018.09.046.

5. Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of machined brass (60/40) in CNC end milling–ANFIS modeling. Ibrahim Maher, Ahmed A. D. Sarhan, Mohamed Eltaib Kafrelsheikh. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. September 2014. DOI: 10.1007/s00170-014-6016-z.

6. Ivanov P.A. Analysis of the probability caricature the surface of channels non-circular cross section processing abrasive flow machining / *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2021. V. 1. p. 30–32. (in Russ).

7. Ivanov P.A., Levko V.A. Prospects of abrasive flow machining of the inner surface of bended tubular parts of rectangular section // *Metalworking*. 2021. № 4. p. 11–19. (in Russ).

8. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. Issue 1–4. p. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>

9. Levko V.A., Litovka O.V., Savin D.I., Terjaev N.S. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: III International Scientific Conference], Krasnoyarsk, 2021, Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. p. 12029. DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029.

10. T.R. Loveless, R.E. Williams, K.P. Rajurkar. A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* 47, (1994) P. 133–151. DOI 10.1016/0924-0136(94)90091-4

11. Levko V.A. Contact processes under abrasive flow machining processes. *Metalloobrabotka = Metalworking*. 2008; 3:19–23. (In Russ.)

12. Levko V.A., Savin D.I., Litovka O.V. Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media. *iPolytech Journal*. 2020;24(1):36–51. (In Russ). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51>

13. Zhang Ke Hua, Ding Jin Fu, Xu Yong Chao. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // *Advanced Materials Research*, 2013. Vol. 797. P.390–395. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390>

14. Ivanov P. A., Levko V. A., Litovka O. V. Modeling and experimental testing of abrasive flow machining of the inner surface of non-circular workpieces. *Metalloobrabotka*, 2022, no 3, pp. 24–34. DOI 10.25960/mo.2022.3.24

15. S. Singh, H.S. Shan, P. Kumar. Wear behavior of materials in magnetically assisted abrasive flow machining. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 128, Issues 1–3, 2022. P. 155–161. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00442-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00442-9)

16. S. Singh, H.S. Shan, P. Kumar. Experimental Studies on Mechanism of Material Removal in Abrasive Flow Machining Process. *Journal of Materials and Manufacturing Processes* Volume 23, Issue 7, 2008. P. 714–718. DOI: 10.1080/10426910802317110

17. Levko V.A. Scientific bases of abrasive flow machining of parts. [Federal State Budgetary Educational Institute of Higher Education «Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev»] Krasnoyarsk, 2015, p. 222. (In Russ.)

18. Tkachuk G.A., Maltsev V.A., Chikova O.A. Research of microstructure and mechanical properties in LS59-1A brass submicrovolumes. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 4. P. 40–47 (In Russ.). DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-40-47](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-40-47).

Иванов Павел Андреевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

levko@sibsau.ru

Литовка Ольга Владимировна – аспирант кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

litovka.9518@gmail.com

Сысоева Любовь Петровна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва

sysoeva.tms@mail.ru

Ivanov Pavel Andreevich – postgraduate student at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

Levko Valery Anatolyevich – D.Sc. of Engineering, docent, professor at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

levko@sibsau.ru

Litovka Olga Vladimirovna – postgraduate student at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

litovka.9518@gmail.com

Sysoeva Lyubov Petrovna – senior lecturer at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

sysoeva.tms@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 621.646.986

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В НЕФТЕГАЗОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ: ТРЕХПОЗИЦИОННАЯ ДИСКОВАЯ ШИБЕРНАЯ ЗАДВИЖКА

С.В. Никитин, Ю.А. Темпель, Д.Е. Писарев
Тюменский индустриальный университет

Аннотация

Лидирующей отраслью промышленности в России остается нефтегазовая отрасль, связанная с добычей и транспортировкой нефти и газа. Для эффективного и результативного обеспечения данных процессов важным остается развитие технологических инноваций в нефтегазовом машиностроении, как одной из подотрасли, служащей основой реализации деятельности нефтегазовых компаний. В связи с этим, исследование и разработка процессных и продуктовых технических и технологических инноваций является актуальной задачей при управлении производственными процессами нефтегазодобычи. В работе представлены результаты систематизации статистических данных в области технологических инноваций в Российской Федерации, затраты на них в обрабатывающем производстве и добыче полезных ископаемых, а также алгоритм проведения исследований и разработки таких инноваций. Проанализированы имеющиеся технические решения шиберных задвижек, выявлены недостатки, смоделирована и предложена конструкция трехпозиционной дисковой шиберной задвижки, обеспечивающая удобство эксплуатации и увеличение показателей долговечности.

Ключевые слова: запорная арматура, задвижка, трубопровод, нефтегазовое машиностроение, технологические инновации.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN OIL AND GAS ENGINEERING: THREE-POSITION BUTTERFLY GATE VALVE

S.V. Nikitin, Yu.A. Tempel, D.E. Pisarev
Tyumen Industrial University

Abstract

The leading industry in Russia remains the oil and gas industry associated with the extraction and transportation of oil and gas. For the effective and efficient provision of these processes, it is important to develop technological innovations in oil and gas engineering, as one of the sub-sectors that serves as the basis for the implementation of the activities of oil and gas companies. In this regard, the research and development of process and product technical and technological innovations is an urgent task in managing the production processes of oil and gas production. The paper presents the results of systematization of statistical data in the field of technological innovations in the Russian Federation, their costs in manufacturing and mining, as well as an algorithm for conducting research and developing such innovations. The available technical solutions for slide gate valves are analyzed, shortcomings are identified, the design of a three-position disk gate valve is modeled and proposed, which provides ease of operation and an increase in durability.

Keywords: stop valves, valve, pipeline, oil and gas engineering, technological innovations.

Введение

Инновационная активность предприятий, в частности в технологической и технической сферах, определяет развитие определенной отрасли, главным образом в решении сложных производственных задач и повышения результативности реализации основных производственных процессов. Особенно это важно при управлении в нефтегазовой отрасли, где существует тенденция устаревания техники, которая подлежит модернизации и совершенствованию.

Наиболее тяжелые по своим последствиям аварии на трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов происходят из-за отказов оборудования, связанных с разливом перекачиваемой среды. При анализе отказов запорной арматуры выявлено, что до 50 % отказов запорной арматуры, возникающих при ее эксплуатации, связаны с потерей герметичности фланцевого разьема «корпус-крышка» и сальникового уплотнения [1].

Многие работы исследователей [1–8] направлены на решение проблем, возникающих при данных вопросах с целью повышения качества эксплуатации трубопроводной арматуры. Основными направлениями развития являются модернизация, разработка и совершенствование конструкций запорной арматуры.

Материал и методы исследования

В исследовании для реализации поставленной цели применялись методы анализа, синтеза, обобщения, моделирования, которые проводились с использованием CAD/CAE-системы Autodesk Inventor.

Результаты исследования и их обсуждение

Технологические инновации представляют собой комплекс мероприятий, способных повысить эксплуатационные и производственные характеристики объектов промышленности нефтегазовой сферы.

В соответствии с анализом статистических данных, представленных на официальном сайте российской статистики Росстата [9] затраты на технологические инновации в промышленности, наблюдая за изменениями с 2017 по 2018 гг., носят нестабильный характер. На *рис. 1* представлены гистограммы затрат на технологические инновации за 2017–2018 гг., которые разбиты на четыре группы: исследование и разработка новых продуктов, услуг и методов их производства (передачи), новых производственных процессов; приобретение машин и оборудования, связанных с технологическими инновациями; приобретение новых технологий; инжиниринг. Наибольшие капиталовложения наблюдаются в первую и вторую группу, которые направлены на развитие производственных процессов, продуктов и приобретение оборудования и машин на реализацию новых технологических инноваций.

Анализ удельного веса организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе обследованных организаций, по Российской Федерации, по видам экономической деятельности за 2018–2021 гг., представлен наглядно на *рис. 2*. В соответствии с графиками можно наблюдать, что больший объем занимают научные исследования и разработки. По трем направлениям – добыча полезных ископаемых, обрабатывающее

производство, научные исследования и разработки – можно видеть стабильные изменения и нерезкие скачки спада и подъема инновационной активности в этих сферах, линии тренда с прогнозом на год свидетельствуют также о незначительном росте активности разработки и исследования технологических инноваций.

Рассматриваемые показатели статистических данных в области технологических инноваций говорят о стабильном финансировании и вкладах в развитие этого направления, а также о необходимости проявить больший интерес к разработке и исследованию инноваций в нефтегазовом машиностроении.



Рис. 1. Гистограммы затрат на технологические инновации по видам инноваций за 2017–2018 гг.

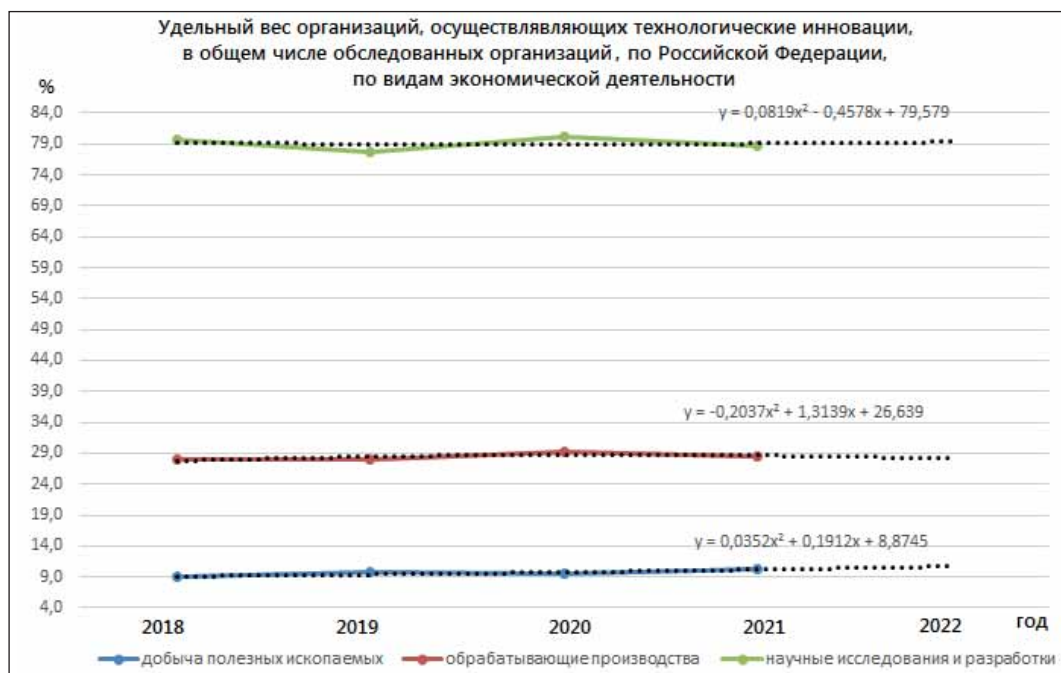


Рис. 2. Графики удельного веса организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе обследованных организаций, по Российской Федерации, по видам экономической деятельности за 2018–2021 гг.

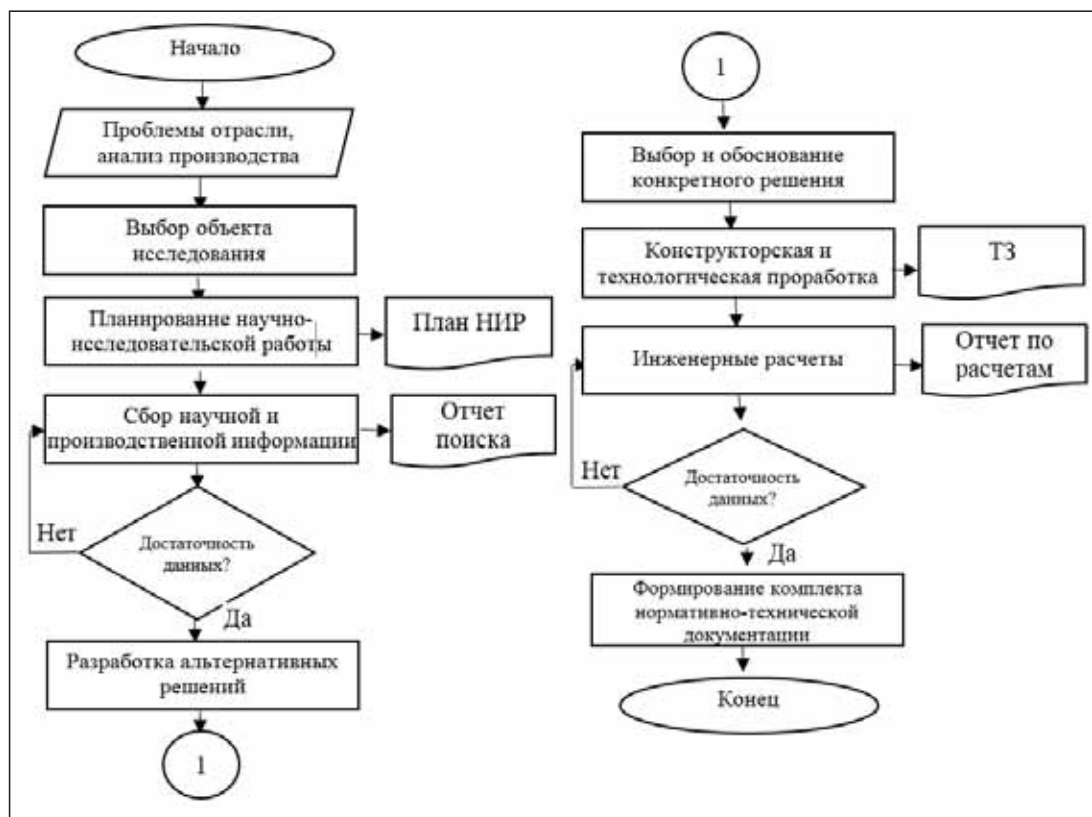


Рис. 3. Алгоритм исследований и разработки технологических инноваций

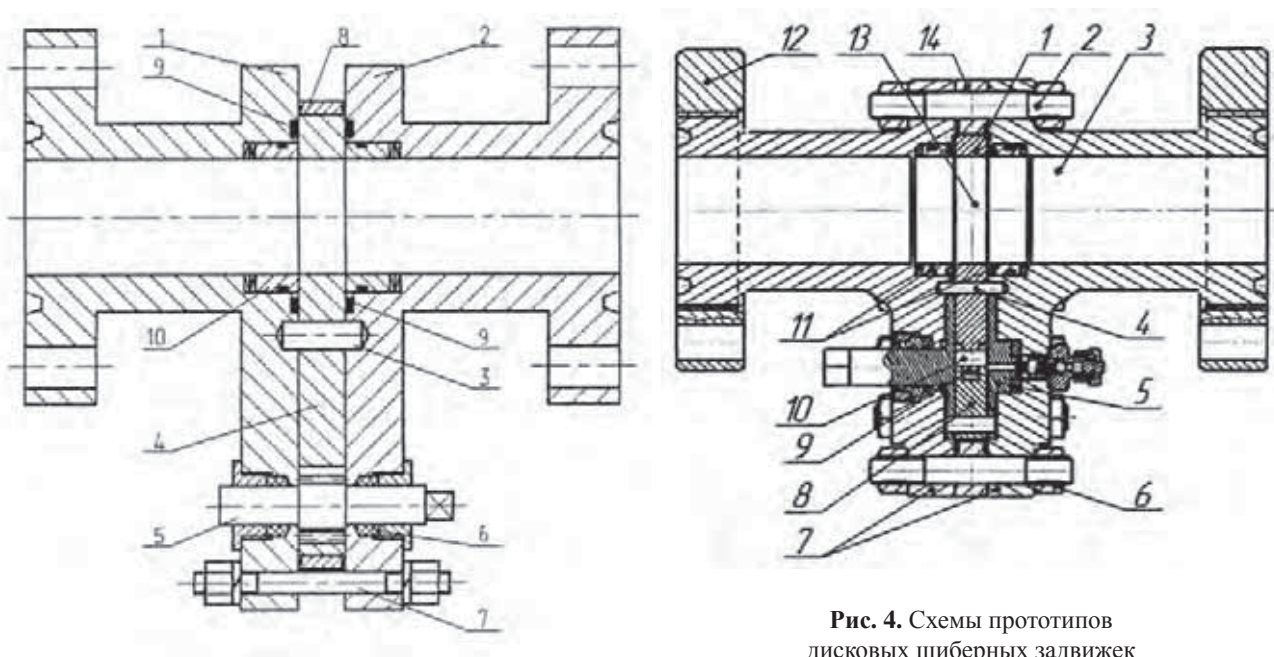


Рис. 4. Схемы прототипов дисковых шиберных задвижек

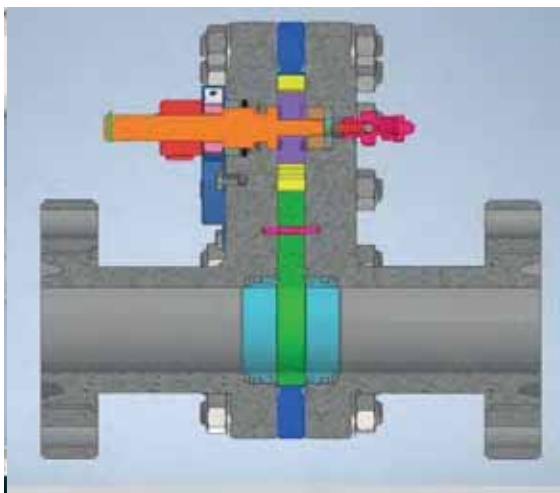
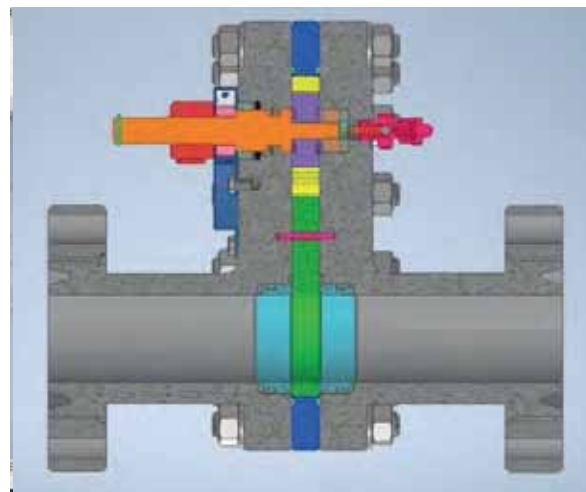
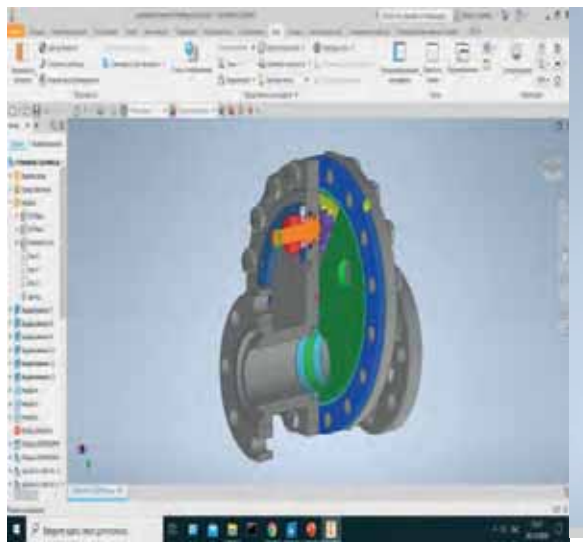


Рис. 5. 3D-модель предлагаемой трехпозиционной дисковой шиберной задвижки

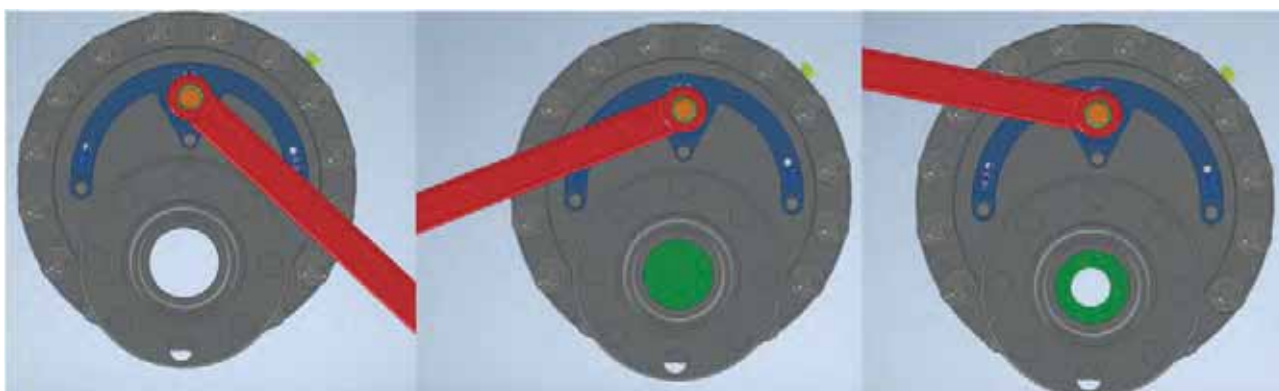


Рис. 6. Положения дискового шибера (частично открытое, закрытое, открытое)

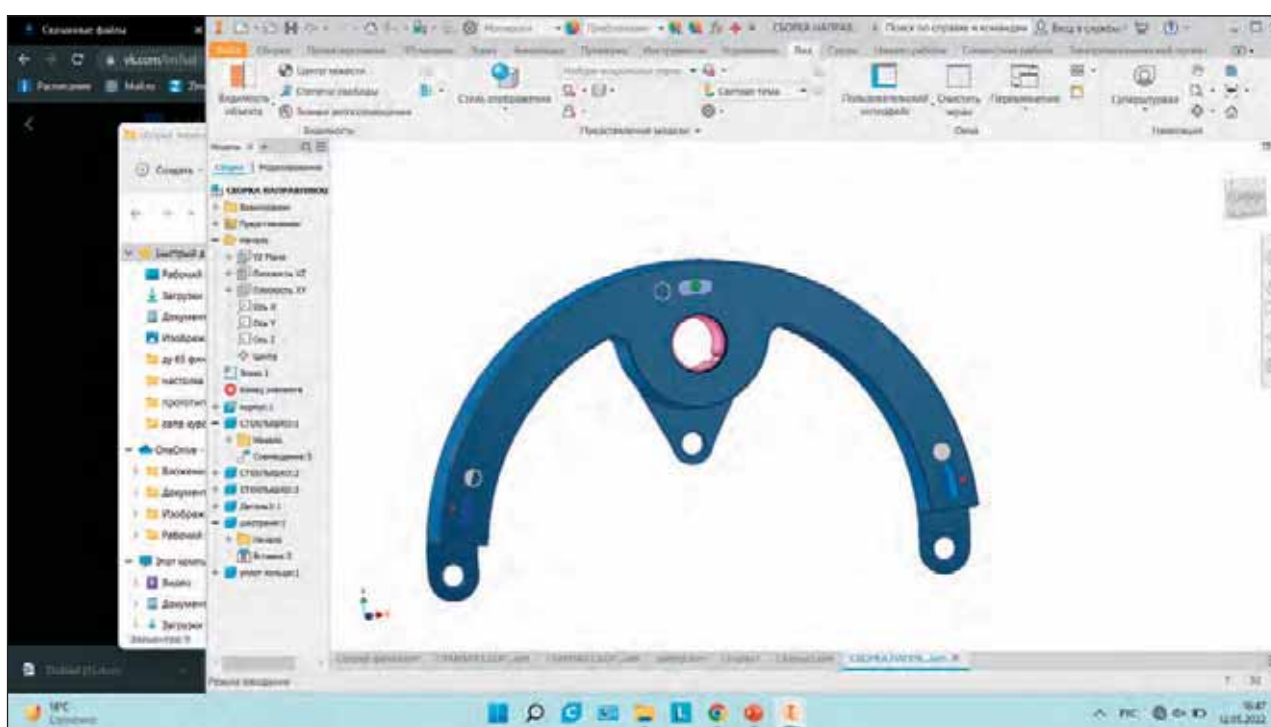


Рис. 7. Механизм отслеживания положения задвижки

Укрупненный алгоритм исследования и разработки технологических инноваций в нефтегазовом машиностроении представлен на *рис. 3*.

Для планирования и разработки технологических (продуктовых или процессных) инноваций необходимо на первых этапах выявить ключевые проблемы предприятия и необходимости нововведений, выбрать объект исследования. Далее необходимо определиться с планом научно-исследовательских работ (НИР) и произвести сбор научной и патентной информации о выявленной проблеме и возможном техническом решении. По результатам отчета о поиске информации идет разработка альтернативных решений, выбор и обоснование конкретного технического решения. По результатам выбора формируется конструкторская и техно-

логическая документация и проводятся инженерные расчеты, оформленные в техническое задание (ТЗ) на выполнение.

В рамках данного исследования рассмотрены проектирование и конструирование продуктовой инновации в области запорной арматуры, решающей задачи повышения долговечности при эксплуатации и удобства применения.

При проведении патентного поиска информации проанализированы прототипы дисковых шиберных задвижек [10, 11], конструктивно представленные на *рис. 4*. Выявлено, что в практическом применении задвижек необходима возможность уменьшения подачи продукта, то есть возможность дросселирования.

Указанную выше проблему решают за счет частичного открытия задвижки. В силу геометрической особенности шиберов это приводит к эффекту турбулентности внутри провода и к увеличению давления на краю шиберов, что является критически недопустимым для данных конструкций. Неправильная эксплуатация задвижки ведет к повреждению на седле, и на самом шибере.

Решение выявленной проблемы возможно при рассмотрении конструктивных особенностей задвижки. Предлагается механизм, который позволит учесть возможность уменьшения подачи продукта за счет двух открытых положений в шибере, вместо одного (как у предшественников), что, конечно, усложняет производство задвижки, но является универсальным решением в случае необходимости снижения подачи продукта. 3D-модель предлагаемого технического решения представлена на *рис. 5*.

В шибере было добавлено еще одно отверстие для частично открытого положения. Задвижка стала трехпозиционной (*рис. 6*). Третья позиция шиберов позволит уменьшать подачу продукта, при этом направление движения жидкости сделать равномерным, что позволит избежать разрушения (промывания) запорной арматуры. Кроме этого, появляется возможность ступенчатой регулировки проходного отверстия шиберов заменой резьбовых вкладышей.

При добавлении в механизм третьего положения шиберов, возникает проблема отслеживания положения шиберов, так как внешне невозможно определить в каком положении находится шибер. Решение этой задачи возможно за счет механизма отслеживания положения задвижки, который представлен на *рис. 7*.

Конструкция представляет собой сварной корпус с тремя вырезами под прозрачные элементы и направляющей внутри, по которой движется рейка, а также шестерня, которая фиксируется на валу. На корпусе и на рейке в соответствующих местах выгравированы и окрашены в соответствующие цвета углубления под указательные элементы.

Выводы

По результатам анализа разработки и реализации технологических инноваций в промышленности за период с 2017–2021 гг. выявлено, что затраты на технологические инновации в рассматриваемых отраслях и инновационная активность носят стабильный характер развития и не предполагают скачкообразного подъема или спада, что также характеризует положительную сторону развития.

Разработано и смоделировано в программной среде Autodesk Inventor техническое решение трех-

позиционной дисковой шиберной задвижки, отличающееся от прототипов тем, что имеет три положения шиберов, которые обеспечивают частично открытое, закрытое, открытое состояния, и способствующее более рациональному использованию таких задвижек, когда существует необходимость уменьшения подачи продукта. Для отслеживания положения в предлагаемой задвижке разработан механизм.

Установлено, что при эксплуатации разработанной трехпозиционной дисковой шиберной задвижки возможно повышение долговечности запорной арматуры, работающей в условиях полной и (или) частичной подачи продукта.

Библиографический список

1. Казанцев М.Н., Флегентов И.А., Петелин А.Н. Пути повышения надежности запорной арматуры для магистральных трубопроводов (на примере задвижек шиберных) // Транспорт, хранение нефти и газа. 2016. т. 14, № 4. С. 75–81.
2. Изосимов А. Пусковая задвижка бурового насоса // Бурение и нефть. 2006. № 2. С. 25.
3. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Шукин П.О. Задвижка запорная для трубопровода // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 8 (50). С. 36–38.
4. Олейников А.В., Иванов В.В. Задвижка аварийного назначения для магистральных трубопроводов // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 18. С. 39–45.
5. Арифалин Р.Х., Ходырев А.И., Каштанов И.М. Задвижка: анализ материально-конструктивного исполнения; расчетный силовой анализ; определение путей оптимизации // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 5. С. 7–16.
6. Олейников А.В., Иванов В.В. Шиберная задвижка для магистральных трубопроводов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 1 (128). С. 66–69.
7. Нурмухаметов А.И., Бикбулатов А.Ш., Назаров А.А. Исследование и моделирование гидродинамических характеристик модифицированной шиберной задвижки с использованием пакета ANSYS // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 4. С. 82–85.
8. Базаров А.А., Бондарева Н.В. Моделирование процессов деформации в запорных устройствах // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 1 (65). С. 100–113.

9. Наука, инновации и технологии – Текст: электронный // Федеральная служба государственной статистики – официальный сайт. – 2022. – <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 25.11.2022).

10. Пат. 155588 Российская Федерация, МПК F16K 3/06, F16K 31/44 Задвижка: №2014144804/06: заявл. 05.11.2014; опубл. 10.10.2015 / Долгушин В.В., Набиев Д.К., Никитин С.В., Макаrchук А.Е., Буякевич В.Н., Медведев Д.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ). – Текст: непосредственный.

11. Пат. 12713 Российская Федерация, МПК F16K 3/06. Задвижка: № 97113549/20: заявл. 06.08.1997; опубл. 27.01.2000 / ЗАО «Технология»; патентообладатель ЗАО «Технология». – Текст: непосредственный.

References

1. Kazantsev M.N., Flegentov I.A., Petelin A.N. Ways to improve the reliability of shut-off valves for trunk pipelines (on the example of gate valves) // Transport, storage of oil and gas. 2016. vol. 14, № 4. pp. 75–81.

2. Izosimov A. Starting valve of the drilling pump // Drilling and oil. 2006. № 2. p. 25.

3. Shegelman I.R., Vasiliev A.S., Shchukin P.O. Shut-off valve for pipeline // Science and business: ways of development. 2015. № 8 (50). pp. 36–38.

4. Oleynikov A.V., Ivanov V.V. Emergency valve for trunk pipelines // Technical sciences – from theory to practice. 2013. № 18. pp. 39–45.

5. Arifulin R.H., Khodyrev A.I., Kashtanov I.M. Gate valve: analysis of material and structural design; computational power analysis; determination of optimization paths // Equipment and technologies for the oil and gas complex. 2013. № 5. pp. 7–16.

6. Oleynikov A.V., Ivanov V.V. Gate valve for trunk pipelines // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. № 1 (128). pp. 66–69.

7. Nurmukhametov A.I., Bikbulatov A.Sh., Nazarov A.A. Investigation and modeling of hydrodynamic characteristics of a modified gate valve using the ANSYS package // Bulletin of the Technological University. 2019. Vol. 22. № 4. pp. 82–85.

8. Bazarov A.A., Bondareva N.V. Modeling of deformation processes in locking devices // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2020. Vol. 28. № 1 (65). pp. 100–113.

9. Science, Innovation and technology – Text: electronic // Federal State Statistics Service – official website. – 2022. – <https://rosstat.gov.ru> (accessed: 11/25/2022).

10. Пат. 155588 Russian Federation, IPC F16K 3/06, F16K 31/44 Gate valve: № 2014144804/06: application 05.11.2014; publ. 10.10.2015 / Dolgushin V.V., Nabiev D.K., Nikitin S.V., Makarchuk A.E., Buyakevich V.N., Medvedev D.A.; patent holder of the Tyumen State Oil and Gas University” (TSOGU). – Text: direct.

11. Пат. 12713 Russian Federation, IPC F16K 3/06. Gate valve: № 97113549/20: application 06.08.1997: publ. 27.01.2000 / CJSC “Technology”; the patent holder of CJSC “Technology”. – Text: direct.

Никитин Сергей Викторович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

Nikitinsv@tyuiu.ru

Темпель Юлия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

Tempelja@tyuiu.ru

Писарев Дмитрий Евгеньевич – обучающийся кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет

Pisarevde@tyuiu.ru

Nikitin Sergey Viktorovich – senior lecturer at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

Nikitinsv@tyuiu.ru

Tempel Yulia Aleksandrovna – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

Tempelja@tyuiu.ru

Pisarev Dmitry Evgenievich – student at the department of “Mechanical Engineering Technology”, Tyumen Industrial University

Pisarevde@tyuiu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

2.5.7. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.777.24.001.5

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИНОВ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ ДНО

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Аннотация

Приведена информация об ответственном отношении классиков прикладной науки о машинах и технологии обработки давлением к профессиональным терминам в этой науке. Описаны применявшиеся разработчиками технологических процессов попытки поиска скрытого значения терминов «прямое» и «обратное» выдавливание для производства штампованных поковок деталей типа стаканов с прилегающим к их дну коническим участком. Приведено рациональное решение проблемы производства указанных поковок, не связанное с названными терминами.

Ключевые слова: втулки с примыкающим к днищу коническим участком, штамповка выдавливанием, течение металла заготовки в стенку, рациональное направление течения.

THE INFLUENCE OF TERMS ON THE CHOICE OF STAMPING TECHNOLOGY FOR HOLLOW CYLINDRICAL PARTS HAVING A BOTTOM

A.M. Dmitriev, N.V. Korobova
MSUT "STANKIN"

Abstract

Information about the responsible attitude of the classics of the applied science of machines and pressure treatment technology to using in this science terms is given. The attempts used by the developers of technological processes to search for the hidden meaning of the terms «forward» and «reverse» extrusion for the production of stamped forgings of parts such as bushings with a conical section adjacent to their bottom are described. A rational solution to the problem of producing these forgings is given, unrelated to the named terms.

Keywords: bushings with a conical section adjacent to the bottom, stamping by extrusion, the flow of the workpiece metal into the wall, rational flow direction.

На кафедре систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» постоянно проводятся исследования и разработки технологических процессов штамповки [1–3]. При этом, чтобы правильно ориентироваться в разнообразии способов штамповки, исследователи вникают в сущность применяемых обработчиками давлением терминов.

Такие классики обработки давлением, как А.И. Зимин, М.В. Сторожев и др., относились к терминам весьма внимательно. На кафедре машин и автоматизации обработки давлением МВТУ им. Н.Э. Баумана, возглавляемой в течение 43 лет А.И. Зиминим, регулярно в рамках научных семинаров кафедры обсуждали значения профессиональных терминов. Эти обсуждения возникали не спонтанно, а заранее среди вопросов, выносимых на научный семинар, сообщалось, что будет обсуждение первой редакции такого-то термина. На следующем научном семинаре – обсуждение второй редакции термина с предыдущего научно-го семинара, а потом – обсуждение первой редакции другого конкретного термина. За подготовку каждого из этих вопросов повестки научного семинара назначался ответственный: профессор или доцент кафедры.

Сказанное выше имело большое значение, поскольку неправильное понимание терминов, как показано ниже в настоящей статье, при организации

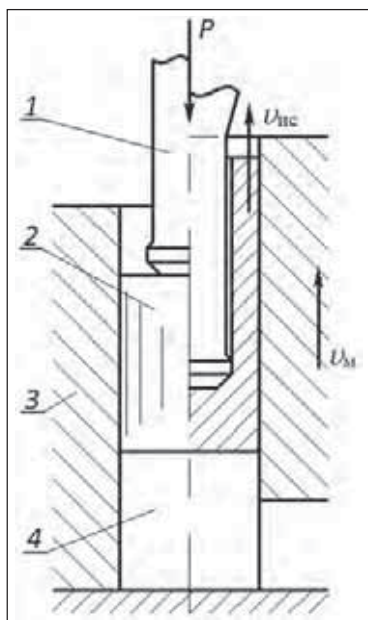


Рис. 1. Схема выдавливания детали типа стакана:

1 – пуансон, формирующий полость, 2 – исходная заготовка, 3 – матрица, 4 – выталкиватель (контрпуансон)

производственных процессов может привести к нецелесообразному расходованию времени и материальных средств. Речь идет о терминах «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание».

Авторы работы [4], посвященной операции штамповки поковок типа стаканов, сопоставили их «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание». Поясним различие этих терминов с использованием *рис. 1*. На этом рисунке изображена схема выдавливания с активно направленными напряжениями контактного трения между заготовкой и матрицей, которые создаются путем перемещения матрицы 3 в направлении течения металла из деформируемой заготовки в стенку стакана со скоростью v_m , превышающей скорость течения металла $v_{ис}$. Показана именно такая схема, поскольку авторы настоящей статьи постоянно сосредотачивают свое внимание на инновационных операциях ХОШ.

Для разъяснения рассматриваемых терминов представим себе, что используется традиционная схема деформирования заготовки в неподвижной матрице, положение которой справа от оси на *рис. 1* аналогично показанному слева от оси.

Поскольку на *рис. 1* пуансон 1 перемещается и внедряется в заготовку 2 под действием силы P , создаваемой движущимся вниз ползуном пресса, металл заготовки вытекает в зазор между пуансоном 1 и матрицей 3 со скоростью $v_{ис}$, направленной навстречу перемещению ползуна пресса. Такое деформирование заготовки называют «обратным выдавливанием» [5].

Комплект инструмента, изображенный на *рис. 1*, кантуем на 180° . При этом пуансон 1 становится нижним, закрепленным неподвижно, а выталкиватель (контрпуансон) 4 – верхним. При использовании того же пресса, имеющего верхнее расположение и рабочий ход вниз его ползуна, пуансон 4 будет перемещаться вниз от действия ползуна пресса. Матрица 3 будет установлена неподвижно, так, чтобы контрпуансон 4 выступал из ее полости и имел возможность достаточного перемещения внутри матрицы 3 для деформирования заготовки 2. При таком деформировании заготовки металл, обтекающий неподвижный, расположенный внизу, пуансон 1, будет течь в том же направлении, в каком перемещается ползун пресса. Такое деформирование заготовки называют «прямым выдавливанием».

В работе [4] был сделан вывод «...все данные исследования и внедрения в производство процесса обратного выдавливания полых цилиндрических изделий из сплошных заготовок в равной степени распространяются на процесс прямого выдавливания этих же изделий из сплошных заготовок».

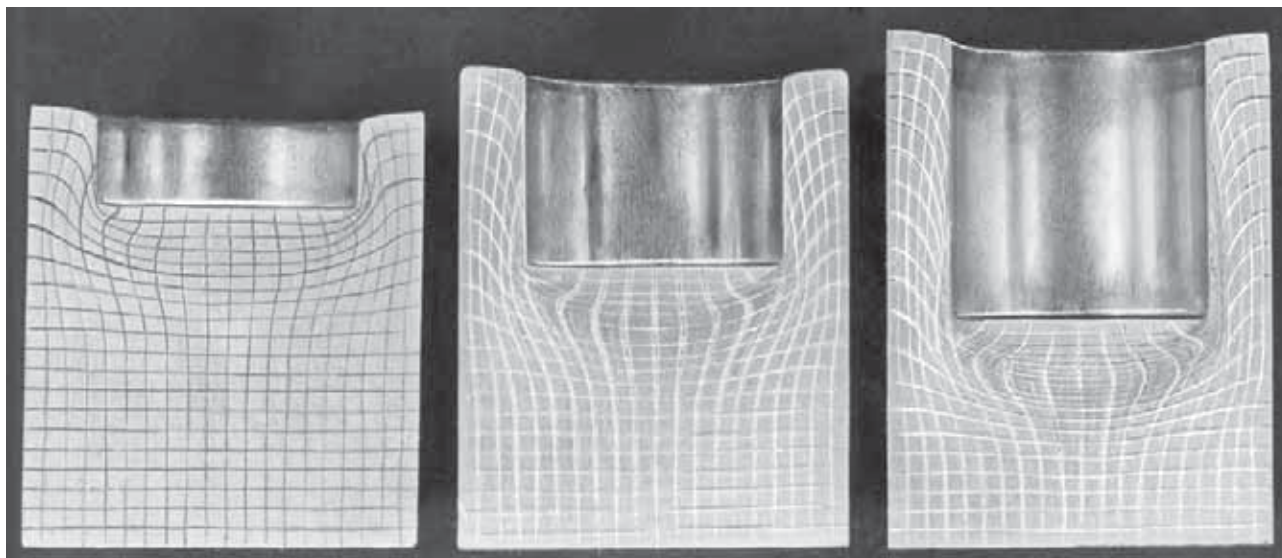


Рис. 2. Ограниченная высота очага пластической деформации при выдавливании стакана

Авторы настоящей статьи не полностью согласны с авторами работы [4] и считают, что в случае применения традиционного штампа с неподвижно закрепленной матрицей, деформирующая заготовку сила при «прямом выдавливании» стакана и, соответственно, энергозатраты на выполнение операции будут несколько выше, чем при «обратном выдавливании». Для объяснения этого проанализируем *рис. 2*.

На *рис. 2* видно по искажениям нанесенной на меридиональный разрез выдавливаемой заготовки координатной сетки, что практически независимо от глубины внедрения пуансона, пластическая деформация сосредоточена в так называемом очаге пластической деформации, имеющем определенную высоту. При теоретических исследованиях штамповки деталей типа стаканов, высота очага пластической деформации определяется из условия минимума энергозатрат на формоизменение заготовки. На расстоянии от торца пуансона, превышающем высоту очага пластической деформации, металл заготовки находится в состоянии равномерного упругого сжатия, и пластическая деформация в нем отсутствует. Искажения координатной сетки нет.

Указанная часть заготовки, пребывающая в состоянии упругого сжатия, при «обратном выдавливании» находится в неподвижном по отношению к матрице, показанной на *рис. 1* слева, положении. В то же время, если бы рассматриваемый комплект инструмента был бы кантован на 180° и в нем производили бы «прямое выдавливание», эта находящаяся в упругом состоянии часть заготовки проталкивалась бы контрпуансоном вдоль полости матрицы, что привело бы к дополнительным затратам силы

на преодоление контактного трения. Таким образом, различие между «обратным выдавливанием» и «прямым выдавливанием» заключается в различной доле силы контактного трения по поверхности полости матрицы в общей величине, деформирующей заготовку силы. При «прямом выдавливании» доля контактного трения больше, чем при «обратном выдавливании». В то же время, при выдавливании заготовки в холодном состоянии и при использовании качественного смазочного материала коэффициент контактного трения $f = 0,07 \dots 0,08$ [5]. Доля силы контактного трения между внешней поверхностью недеформируемой пластической частью заготовки и поверхностью полости матрицы в общей силе выдавливания заготовки незначительна.

При реализации приведенной на *рис. 1* инновационной схемы выдавливания с перемещением матрицы в направлении течения металла в стенку штампуемого стакана, различие между «обратным выдавливанием» и «прямым выдавливанием» стирается полностью. В зависимости от скорости перемещения матрицы v_m , без кантования инструмента на 180° (для расположения формирующей полость в заготовке пуансона I сверху или внизу), могут быть реализованы контактные взаимодействия между матрицей и заготовкой, соответствующие «обратному выдавливанию» или «прямому выдавливанию».

Внимание, проявленное авторами настоящей статьи к этим терминам, связано с тем, что при разработке производства деталей типа стаканов, имеющих конический придонный участок, существенное, превышающее проанализированное выше, изменение величины, деформирующей заготовку силы, технологи пытались объяснить изменением

направления течения металла по отношению к направлению движения ползуна прессы. При этом обсуждалась замена «обратного выдавливания» на «прямое выдавливание».

На производственных предприятиях, если речь идет о штамповке деталей типа стаканов, вне зависимости от направления течения металла, штамповочную операцию называют «обратным выдавливанием». В отличие от выдавливания деталей типа ступенчатых сплошных стержней, которое называют «прямым выдавливанием». Таким образом, термины жестко связывают с типом штампуемых деталей. Это объясняется тем, что в применяемых в промышленности штампах, металл заготовки при выдавливании детали типа стакана всегда вытекает в стенку штампуемой поковки в направлении, противоположном направлению движения вниз ползуна прессы.

Организация «прямого выдавливания» детали типа стакана на универсальных прессах вызывает существенные трудности и применяется очень редко. Одна из этих трудностей будет разъяснена в настоящей статье ниже.

К проблеме выбора между «обратным выдавливанием» и «прямым выдавливанием» деталей типа стаканов вернулись при рассмотрении штамповки деталей, имеющих коническую расширяющуюся придонную часть (рис. 3).

Произошло это после выхода в свет работы [6]. Термин «прямое выдавливание» в работе применен при описании операции штамповки изображенных на рис. 3 слева поволоков с использованием штампа, схема которого приведена на рис. 6.

В указанной работе сообщено, что приведенную на рис. 4 схему «прямого выдавливания» японский исследователь М. Куноги опубликовал в 1966 г. при описании своих работ по холодному выдавливанию стаканов из стали. Отмечено, что сила штамповки при такой схеме снижается в 1,5 и более раз по сравнению со штамповкой рассматриваемых деталей по схеме «обратного выдавливания».

Выше при рассмотрении работы [4] в настоящей статье было показано, что «прямое выдавливание» требует создания несколько большей силы, чем «обратное выдавливание». Превышение силы было объяснено влиянием контактного трения между заготовкой и матрицей. При выдавливании по методу М. Куноги – наоборот. При этом снижение силы при выдавливании по методу М. Куноги многократно больше того её превышения, которое выше было объяснено изменением силы контактного трения.

Показанная на рис. 4 схема привлекала к себе значительный интерес исследователей и технологов [7]. Характерно, что авторы посвященных исследованию

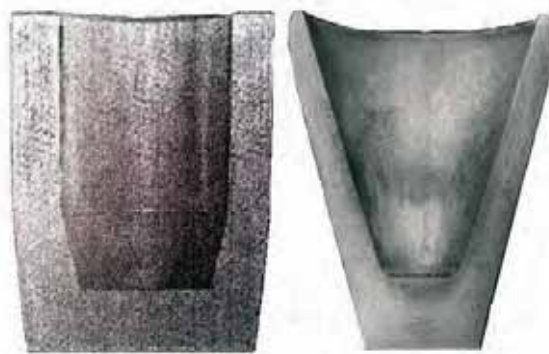


Рис. 3. Стаканы с конической придонной частью

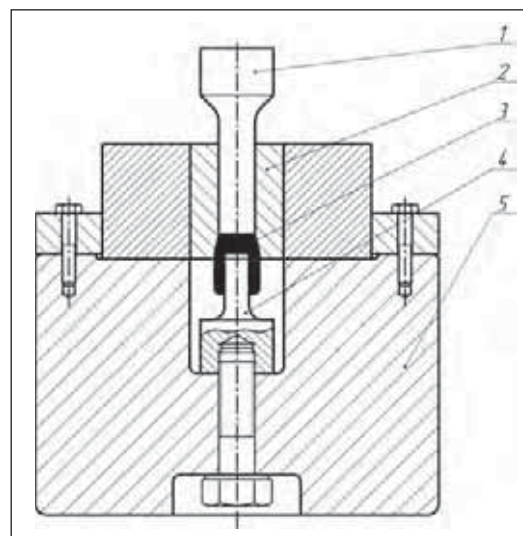


Рис. 4. Конструкция штампа для прямого выдавливания:

1 – верхний пуансон, 2 – матрица, 3 – изделие, 4 – нижний пуансон, 5 – опорная плита

этой схемы работ сосредоточили свое внимание на том, что снижение необходимой деформирующей заготовку силы происходит непременно при течении металла в направлении перемещения ползуна прессы (при «прямом выдавливании») и связано с некими процессами из области физики металла деформируемой заготовки.

Необходимость, по мнению авторов указанных публикаций, осуществления именно «прямого выдавливания» привела к созданию конструкции промышленного штампа [8], схематично показанной на рис. 5. В этом штампе съемник 2 предназначен для освобождения пуансона от штампованной поковки. Штампованная поковка со съемника удаляется сталкивающим устройством. Новая заготовка устанавливается на освобожденный съемник 2. При ходе ползуна прессы вниз матрица 4, установленная на верхней плите 6 штампа, опускается по направляющей 8 до упора в нижнюю часть штампа, при этом образуется постоянный зазор между коническими поверхностями пуансона 1 и матрицы 4. Одновременно с этим заготовка

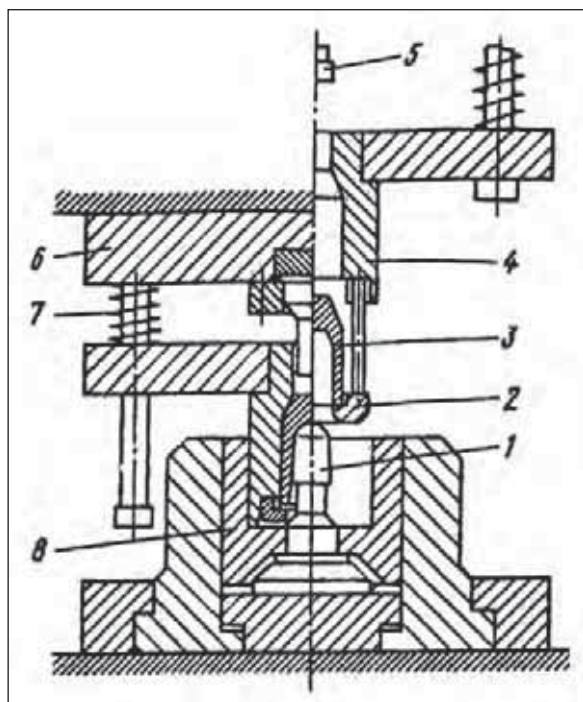


Рис. 5. Промышленный штамп для «прямого выдавливания» показанных на рис. 3 слева, деталей

пуансоном 5 проталкивается в участок полости матрицы меньшего диаметра. При дальнейшем опускании ползуна пресса пуансон 5, перемещаясь внутри верхнего участка полости матрицы 4, выдавливает заготовку в зазор между пуансоном 1 и матрицей 4. При этом матрица 4 поджимается к нижней части штампа силами трения между деформируемой заготовкой и участком полости матрицы меньшего диаметра, а на заключительной стадии выдавливания – также пружинами 7. При возвратном ходе ползуна пресса штампованная поковка 3 снимается с пуансона 1 съемником 2.

Штампы, созданные по схеме, приведенной на рис. 5, были изготовлены и прошли апробацию на нескольких выпускающих крупносерийную продукцию заводах. При этом возникли проблемы. Причина их заключалась в том, что штампы устанавливали на универсальные прессы, не имевшие выталкивателей, расположенных в ползунах. Поэтому невозможно было вытолкнуть штампованную поковку 3, застрявшую в матрице 4. Обязательным условием непрерывного серийного производства являлось нахождение при открытии штампа поковки 3 на пуансоне 1. Этому было уделено большое внимание технологов. Тем не менее, поковка оставалась на пуансоне не всегда. Это приводило к остановке производственного процесса и демонтажу матрицы с целью извлечения из нее застрявшей поковки. Поскольку предусматривалось производство поволоки на автоматических линиях, даже редкие случаи за-

стревания поковки в матрице надолго останавливали производственный процесс.

Таким образом, внедрение технологии в промышленное производство изделий не было реализовано.

Вопрос о влиянии направления течения металла при штамповке стаканов на силу выдавливания оставался без однозначного ответа до последнего времени. В частности, в 2012 г. была опубликована работа [9], в которой запатентован способ выдавливания, приведенный на рис. 4. Авторы указанной работы изменили термин и назвали операцию «продольно-поперечным выдавливанием», целью которого, как и в способе, приведенном в работе [6], является снижение величины деформирующей заготовки силы. В настоящей статье мы постарались ответить на обсуждаемый вопрос.

Для исключения при ответе на этот вопрос влияния терминов, целесообразно обратиться к учебнику [10], написанному классиками прикладной науки обработки давлением в машиностроении. Этот учебник в период с 1957 по 1977 гг. был издан четыре раза издательством «Машиностроение» значительными тиражами. Также он был переведен и издан на китайском, немецком и польском языках. В 1974 г. за этот учебник его авторы были удостоены Государственной премии СССР.

В учебнике авторы называют выдавливанием операцию, при которой «происходит истечение металла, заключенного в замкнутую полость, через отверстие в ней, форма которого определяет поперечное сечение выдавленного участка деформированной заготовки». Они отмечают, что штамповка выдавливанием принципиально не отличается от процессов прессования, которые широко распространены в металлургии для производства прутков, профилей и труб из различных материалов. Таким образом, они связывают термин с типом штампуемой детали, т.е. используют подход, который мы уже отмечали выше в настоящей статье.

Деформирование заготовки, направленное на производство поволоки типа стаканов, авторы учебника отделяют от процессов выдавливания и называют «закрытой прошивкой». «Закрытая прошивка» заготовки отличается от «открытой прошивки» тем, что исходная сплошная заготовка перед её прошивкой помещается в матрицу.

Авторы настоящей статьи, а также А.Л. Воронцов и Н.Е. Попов, подвергли сомнению предположение предшествующих разработчиков о том, что снижение деформирующей силы при штамповке способом, показанным на рис. 4, связано с направлением течения металла. Это снижение объясняется рациональным сочетанием операций «закрытой прошивки» заготовки и последующей раздачи формирующейся стенки стакана.

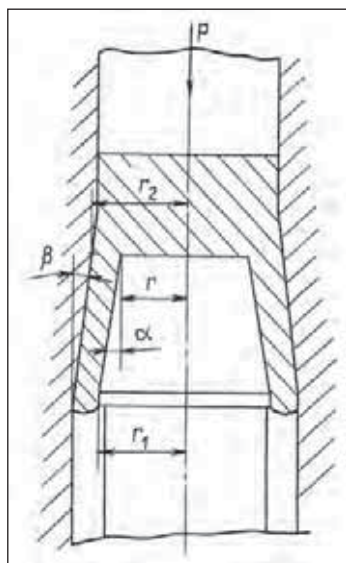


Рис. 6. Схема закрытой прошивки, совмещенной с раздачей трубной части стакана

Для обоснования этого положения экспериментально исследованы величины удельной силы q [МПа], действующей на плоский торец пуансона, осуществляющего закрытую прошивку полости. Напомним, что удельная сила – это приложенная к элементу инструмента сила P [МН], деленная на площадь поперечного сечения этого элемента, перпендикулярно направлению приложенной силы (рис. 6).

Исследовано изменение относительной (по отношению к напряжению текучести σ_s [МПа] заготовки) удельной деформирующей силы $q/\sigma_s|r_1$, действующей в поперечном сечении пуансона (рис. 6), имеющем радиус r_1 , а также относительной удельной силы, действующей на торец пуансона $q/\sigma_s|r$. При планировании эксперимента задана следующая форма математической модели:

$$y = b_0 + b_1 r_2 + b_2 \alpha + b_3 r_1 + b_4 \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta + b_{11} r_2^2 + b_{22} \alpha^2 + b_{33} r_1^2. \quad (1)$$

В модели (1) первый фактор – относительный радиус матрицы $r_2 = r_2/r$ в поперечном ее сечении на уровне выхода металла из-под торца пуансона в коническую часть стакана. Второй фактор – угол конусности пуансона α . Третий фактор – относительный радиус пуансона $r_1 = r_1/r$. Четвертый фактор – соотношение тангенсов углов конусности матрицы и пуансона $\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$. В приведенных здесь формулах r , r_1 , r_2 – радиусы пуансона в миллиметрах, показанные на рис. 8. Отношение $\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$ характеризует дополнительное давление на деформируемый материал в стенке стакана, имеющее место в результате сужения зазора между пуансоном и ма-

трицей. Это дополнительное давление препятствует разрыву стенки штампуемого полуфабриката при его раздаче.

Штамповали заготовки из сплава АД1. Напряжение текучести σ_s для расчета относительных удельных сил устанавливали по диаграмме истинных напряжений, построенной по результатам испытания образцов на сжатие. В результате деления разъясненной выше удельной силы q на σ_s , определены относительные удельные силы. Образец изготовленного ХОШ экспериментального стакана приведен на рис. 5 справа.

По результатам эксперимента построены следующие математические модели:

$$q/\sigma_s|r_1 = 48,76 + 20,8 r_2^2 - 62,16 r_2 - 0,089 \alpha, \quad (2)$$

$$q/\sigma_s|r = 4,93 + 4,8 r_1 - 5 r_2 - 0,112 \alpha. \quad (3)$$

Количество членов, входящих в модели (2) и (3) меньше, чем количество членов в модели (1). Это объясняется тем, что после расчета коэффициентов у членов, входящих в модель (1), и проведения статистического анализа для рассчитанных коэффициентов, значимость некоторых из них не подтвердилась, и из моделей (2) и (3) члены с этими коэффициентами были исключены. В частности, значимость членов, описывающих влияние соотношения тангенсов углов конусности $\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$ матрицы и пуансона на величины действующих относительных удельных деформирующих заготовки сил, не подтвердилась. Это объясняется тем, что при формировании полости пуансонами, имеющими рассматриваемые углы конусности, вектор деформирующей заготовку силы имеет наибольшую составляющую в направлении к оси пуансона. Поэтому деформируемый металл обжимает пуансон по боковой поверхности, не внося при этом существенной добавки в величину нужной для осуществления штамповки силы, действующей вдоль оси пуансона со стороны ползуна пресса.

Анализ построенных моделей показал, что удельная сила, действующая на торец пуансона при выполнении рассматриваемой операции, имеет примерно такую же величину, как при закрытой прошивке цилиндрической полости в цилиндрической заготовке. Следовательно, необычных физических явлений в деформируемом металле не происходит.

Эффект снижения деформирующей силы при штамповке по схеме М. Куноги (рис. 4) достигается благодаря тому, что в начале выполнения закрытой прошивки (рис. 6) штампуются стакан с относительной толщиной стенки $R = 1,5$. При этом величина q/σ_s наименьшая [11]. Кроме того, форма матрицы,

Усредненные значения относительных удельных сил

Уровень фактора	r_2			α , град			r_1		
	1,2	1,35	1,5	6	9	15	1,1	1,2	1,3
$q/\sigma_s r_1$	3,23	1,87	1,43	2,6	2,17	1,77	2,4	2	2,13
$q/\sigma_s r$	3,87	2,57	2,03	3,33	2,83	2,3	2,4	2,7	3,37

в которой происходит закрытая прошивка заготовки, имеет расширяющуюся коническую поверхность, что исключает увеличение q/σ_s , вызываемое прогибом стенки полости матрицы [12]. При дальнейшем деформировании заготовки составляющая

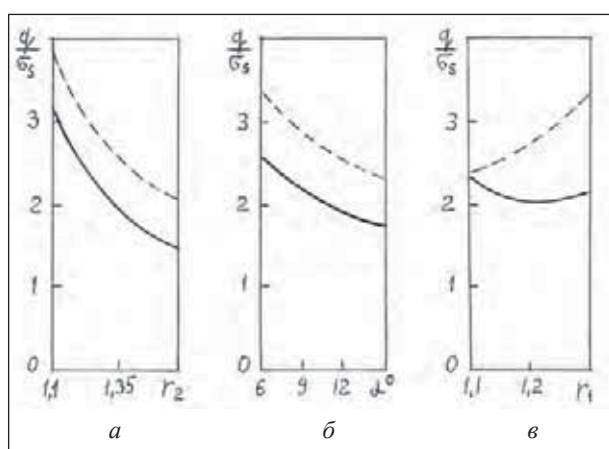


Рис. 7. Зависимости относительных удельных сил выдавливания $q/\sigma_s|r_1$ и $q/\sigma_s|r$ от размеров инструмента: r_2 , α (град), r_1

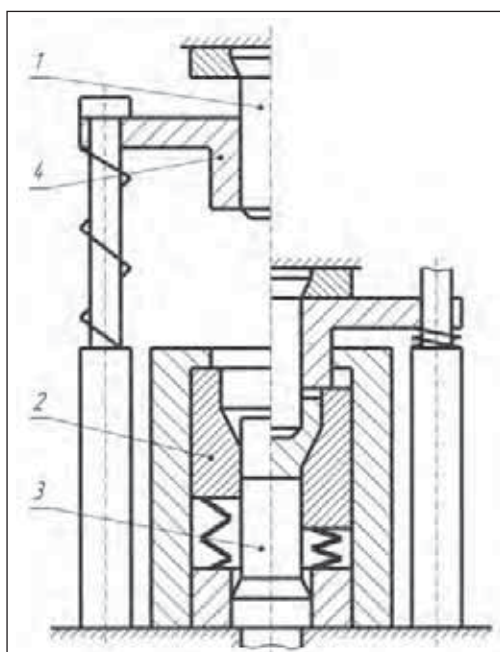


Рис. 8. Штамп для закрытой прошивки, совмещенной с раздачей заготовки, в движущейся матрице

силы штамповки, производящей увеличение диаметра полости детали, направлена к оси заготовки и не приводит к существенному увеличению силы, создаваемой прессом.

Выявлены зависимости относительных удельных сил $q/\sigma_s|r_1$ и $q/\sigma_s|r$ от каждого из трех факторов: r_2 , α , r_1 , влияние которых признано значимым. Чтобы выделить влияние одного из этих факторов и исключить влияние двух других факторов, определены средние арифметические значения относительных удельных сил для каждого признанного значимым фактора. Эти средние значения приведены в таблице и на их основании построены графики (рис. 7).

На графиках на рис. 7 пунктирные линии относятся к удельным силам $q/\sigma_s|r$, приложенным к торцам пуансонов, сплошные линии – к удельным силам $q/\sigma_s|r_1$, действующим в пуансонах на уровне r_1 (рис. 6). Поскольку напряжения от раздачи формирующейся стенки стакана на конической поверхности пуансона не вносят существенный дополнительный вклад в величину силы прошивки, а площадь поперечного сечения пуансона при переходе от торца с радиусом r к калибрующему пояску, имеющему радиус r_1 , возрастает существенно, имеет место снижение удельной силы $q/\sigma_s|r_1$.

Изложенное выше позволяет заключить, что снижение силы штамповки рассматриваемых деталей является результатом рационального сочетания операций закрытой прошивки заготовки и раздачи на пуансоне стенок формирующегося при прошивке стакана. Результат такого рационального сочетания операций не зависит от того, течет ли материал деформируемой заготовки в направлении перемещения ползуна прессы или в обратном направлении.

Следовательно, характерное для рассматриваемой схемы закрытой прошивки снижение величины деформирующей силы может быть получено при использовании штампа, схема которого приведена на рис. 8 [13].

В отличие от конструкции штампа, показанной на рис. 5, в штампе на рис. 8, установленном на универсальный пресс, не возникает проблем с извлечением штампованной детали из матрицы. Оно осуществляется выталкивателем прессы.

Штамп работает следующим образом. При опускании верхней плиты с пуансоном 1 приводится в движение съемник 4, который в момент касания пуансоном заготовки начинает синхронно перемещать вниз матрицу 2. По окончании закрытой прошивки выталкиватель 3 удаляет штампованную деталь из матрицы. Если происходит застревание детали на пуансоне, она снимается при возвратном ходе ползуна прессы съемником 4.

Описанная в настоящей статье проблема, возникшая в связи с употреблением терминов «прямое выдавливание» и «обратное выдавливание», полностью исключается при проведении штамповки на специализированных прессах, снабженных дополнительным приводом для принудительного перемещения матрицы [14].

Библиографический список

1. Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е. Совершенствование процесса интенсивной пластической деформации // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 4 (23). – С. 44–48.
2. Коробова Н.В., Самигулин Д.А. Снижение риска возникновения разрывов при отбортовке равноканального тонкостенного тройника // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2020. № 4 (55). – С. 48–54.
3. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Конструирование штампов для формования высокоплотных полых осесимметричных порошковых деталей // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2022. № 1 (60). – С. 48–52.
4. О холодном выдавливании полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали / В.П. Кузнецов, В.Н. Рогожин, П.И. Татаринов, Е.А. Закуренов // Кузнечно-штамповочное производство. 1972. № 6. – С. 5–8.
5. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков; Под ред. А.М. Дмитриева. – 2-е изд., перераб. и доп.; Под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение. 2010. – 352 с.
6. Эверхард Д. Холодное прессование металлов. Пер. с англ. – М.: Машиностроение. 1968 г. – 147 с.
7. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. – М.: Машиностроение. 1979. – 567 с.
8. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; Под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. 1996. – 736 с. / Пункт 3.4.4. Штамповка на гидравлических прессах. – С. 143–148.

9. Патент № 2446909 (РФ). Способ изготовления гильз патронов стрелкового оружия / Ю.И. Гуменюк, Н.В. Спасенко, В.А. Яшкин и др. Оpubл. 10.04.2012. Бюл. № 10.

10. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1977. – 423 с.

11. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Якубовская И.А. Повышение стойкости пуансонов при холодном выдавливании детали типа стакана при активном действии сил трения // Вестник машиностроения. 2015. № 9. – С. 24–29.

12. Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Снижение деформаций штампов при холодном выдавливании стальных стаканов с активно направленными напряжениями контактного трения по матрице // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 5. – С. 72–84.

13. А.с. № 1238877 (СССР). Способ изготовления деталей типа стаканов и устройство для его осуществления / А.Л. Воронцов. Оpubл. 23.06.86. Бюл. № 23.

14. Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах / Н.В. Коробова, А.М. Дмитриев, Н.С. Толмачев, А.Ю. Аксененко // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 7. – С. 15–19.

References

1. Sosenushkin E.N., Ovechkin L.M., Sosenushkin A.E. Improvement of the process of intensive plastic deformation // Vestnik MSUT “STANKIN”. 2012. № 4 (23). – pp. 44–48.
2. Korobova N.V., Samigulin D.A. Reducing the risk of ruptures during flanging of an equal-channel thin-walled tee // Vestnik MSUT “STANKIN”. 2020. № 4 (55). – pp. 48–54.
3. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Design of dies for forming high-density hollow axisymmetric powder parts // Vestnik MSUT “STANKIN”. 2022. № 1 (60). – pp. 48–52.
4. On cold extrusion of hollow cylindrical products made of low-carbon steel / V.P. Kuznetsov, V.N. Rogozhin, P.I. Tatarinov, E.A. Zakurenov // Forging and stamping production. 1972. № 6. – pp. 5–8.
5. Forging and stamping: Handbook. In 4 v. V. 3. Cold volumetric stamping. Stamping of metal powders; Edited by A.M. Dmitriev. – 2nd ed., reprint. and additional; Under the general editorship of E.I. Semenov. – M.: Mechanical Engineering. 2010. – 352 p.

6. Everhard D. Cold pressing of metals. Trans. from English – M.: Mechanical engineering. 1968. – 147 p.
7. Johnson W., Mellor P. Theory of plasticity for engineers. – M.: Mechanical Engineering. 1979. – 567 p.
8. Mechanical engineering. Encyclopedia / Ed. soviet K.V. Frolov (the chairman) and others – M.: Mechanical Engineering. Technologies of draft production. Т. III-2 / I.L. Akaro, R.A. Andrievsky, A.F. Arzhanov, etc.; Under the general editorship of V.F. Manuylov. 1996. – 736 p. / Point 3.4.4. Stamping on hydraulic presses. – pp. 143–148.
9. Patent № 2446909 (RF). Method of manufacturing small arms cartridge casings / Yu. I. Gumenyuk, N.V. Spasenko, V.A. Yashkin, etc. Publ. 10.04.2012. Byul. № 10.
10. Storozhev M.V., Popov E.A. Theory of metal processing by pressure: Textbook for universities. Ed. 4th, reprint. and additional – M.: Mechanical engineering. 1977. – 423 p.
11. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Yakubovskaya I.A. Increasing the resistance of punches during cold extrusion of a glass-type part under the active action of friction forces // Vestnik of Mechanical Engineering. 2015. № 9. – pp. 24–29.
12. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Reduction of stamp deformations during cold extrusion of steel cups with actively directed contact friction stresses along the matrix // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2019. № 5. – pp. 72–84.
13. Copyright certificate №. 1238877 (USSR). A method for manufacturing glass-type parts and a device for its implementation / A.L. Vorontsov. Publ. 23.06.86. Byul. № 23.
14. Investigation of high-density powder cylindrical blanks formed on specialized hydraulic presses / N.V. Korobova, A.M. Dmitriev, N.S. Tolmachev, A.Y. Aksenenko // Procurement production in mechanical engineering. 2015. № 7. – pp. 15–19.

Дмитриев Александр Михайлович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор кафедры систем пластического деформирования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
countess.olga@gmail.com

Коробова Наталья Васильевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой систем пластического деформирования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mt-6@yandex.ru

Dmitriev Alexander Mikhailovich – corresponding member of Russian Academy of Sciences, D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Systems of plastic deformation department”, MSUT “STANKIN”
countess.olga@gmail.com

Korobova Natalia Vasilievna – D. Sc. of Engineering, Head of the sub-department of “Systems of plastic deformation department”, MSUT “STANKIN”
mt-6@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.
