

ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 1 (60), 2022

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Драпак К.А., Крылов Е.В., Капитанов А.В.

Методика многокритериальной оценки эффективности работы регазификационных терминалов..... 8

Афони́на И.В., Глубоков А.В.

Выбор методики измерения линейного размера цилиндрической детали координатным методом 13

Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г.

Автоматизированная система формирования и предоставления данных о поверке средств измерений как инструмент повышения эффективности функционирования организации..... 17

Карлов А.Г.

Теоретическая и методологическая основа, функциональные возможности программного продукта Solving Mill 2.0 при создании инновационных технологий и технических систем автоматизации производства..... 22

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Фомин Е.В., Снегирева К.К.

Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов 32

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Жуков С.В., Стерлин А.Я., Суминов И.В.

Технология полимер-металлооксидных композитов для адаптивной защиты от схватывания и заедания при трении на примере антифрикционных слоев, полученных методом плазменно-электролитической обработки цилиндров модулятора высокоэнергетического акустического излучения 37

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ**Дмитриев А.М., Коробова Н.В.**

Конструирование штампов для формования высокоплотных полых осесимметричных порошковых деталей..... 48

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**Панфилов П.В.**

Модуль для быстрого прототипирования управления мехатронным устройством 53

Вельтищев В.В., Аладышева Е.И.

Разработка и реализация программного обеспечения для анализа пространственного положения кабельной линии гибридного подводного робототехнического комплекса 58

Гаврилина Е.А., Честнов В.Н.Синтез системы управления высокоманевренного необитаемого подводного аппарата с использованием H_∞ подхода..... 62**СОБЫТИЯ И ДАТЫ**

«Металлообработка-2021» глазами участников выставки 72

VESTNIK MSUT «Stankin»
№ 1 (60), 2022

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Drapak K.A., Krylov E.G., Kapitanov A.V.**
Method for multi-criteria assessment of regasification terminals efficiency 8
- Afonina I.V., Glubokov A.V.**
Selection of a method for measuring the linear size of a cylindrical part by the coordinate method 13
- Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G.**
An automated system of generating and providing verification data of measuring instruments as a tool for improving the efficiency of the organization's functioning 17
- Karlov A.G.**
Theoretical and methodological basis, functional capabilities of the Solving Mill 2.0 software product in the creation of innovative technologies and technical systems for industrial automation 22

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

- Fomin E.V., Snegireva K.K.**
Planning an experimental study cutting of alpha titanium alloys 32

TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

- Zhukov S.V., Sterlin A.Y., Suminov I.V.**
Technology of polymer-metal oxide composites for adaptive protection against setting and jamming during friction on the example of antifriction layers obtained by plasma-electrolytic treatment of cylinders of a modulator of high-energy acoustic radiation 37

TECHNOLOGIES AND MACHINES OF PROCESSING BY PRESSURE**Dmitriev A.M., Korobova N.V.**

Design of dies for forming high density hollow axisymmetric powder parts 48

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS**Panfilov P.V.**

Module for rapid prototyping of mechatronic device control 53

Veltishchev V.V., Aladysheva E.I.

Development and implementation of software for analyzing the spatial position of the cable line of the hybrid underwater robotic system 58

Gavrilina E.A., Chestnov V.N.

Synthesis of an attitude control system for highly maneuverable underwater vehicle using H-infinity approach 62

EVENTS AND DATES

«Metalloobrabotka-2021» through the eyes of exhibitors 72

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5:622.276

К.А. Драпак, Е.Г. Крылов, А.В. Капитанов
K.A. Drapak, E.G. Krylov, A.V. Kapitanov

МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РЕГАЗИФИКАЦИОННЫХ ТЕРМИНАЛОВ

METHOD FOR MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF REGASIFICATION TERMINALS EFFICIENCY

Рассмотрены общие производственные показатели добычи газа на СПГ-терминалах ПАО «НК «Роснефть». Выявлены основные группы критериев, необходимые для идентификации рисков при работе автоматизированного технологического оборудования СПГ-терминалов. Разработан алгоритм многокритериальной оценки эффективности проектов модернизации СПГ-терминалов.

The general production indicators of gas production at LNG terminals of PJSC «NK «Rosneft» are considered. The main groups of criteria are identified, which are necessary to identify risks during the operation of automated process equipment of LNG terminals. An algorithm for multi-criteria assessment of the effectiveness of projects for the modernization of LNG terminals has been developed.

Ключевые слова: СПГ-терминал, надежность, идентификация, риск, критерий оптимальности.

Keywords: LNG terminal, reliability, identification, risk, optimality criterion.

Анализ ежегодных показателей результатов деятельности ПАО «НК «Роснефть» выявил снижение добычи природного газа и нефти, а также ввода новых

скважин в 2020 году по сравнению с 2019 и 2018 годом (табл. 1). Указанное снижение добычи нефти и газа произошло на фоне соглашения ОПЕК+.

Таблица 1. Производственные показатели добычи газа «Роснефть» за 2018-2020 годы [1]

Показатель	2018	2019	2020
Добыча нефти и газового конденсата, млн. куб. м	2,9	2,6	-
Добыча газа, млрд. куб. м	67,3	67,0	62,8
Ввод новых скважин, тыс. ед.	3,484	2,9	2,6
Добыча жидких углеводородов, млн. т	230,2	230,2	204,5
Доказанные запасы газа по классификации PRMS, млрд. куб. м	2420	2452	2106

В этой связи строительство и модернизация терминалов для хранения и транспортировки сжиженного природного газа (СПГ-терминалы) представляется перспективным направлением развития в области энергетики. Регазификация природного газа на СПГ-терминалах является технологическим процессом, в котором используются различные виды сложного и дорогостоящего автоматического и автоматизированного оборудования. СПГ-терминал представляет собой специальный регазификационный комплекс, состоящий из причала, сливной эстакады, резервуаров для хранения, испарительной системы, установок обработки газов испарения из резервуаров, узла учета и технологических блоков [2].

При строительстве и эксплуатации СПГ-терминала необходима количественная оценка опасностей, которая позволит учитывать прилегающие или находящиеся в сфере ответственности портовые хозяйства и зоны проживания гражданского населения, а также географические условия портовых территорий и курортных зон с целью снижения вероятности возникновения аварий и техногенных катастроф. Для достижения необходимого уровня надёжности автоматизированного оборудования необходимо выполнить комплекс специальных работ. В его состав входят мероприятия, нацеленные на решение следующих задач [3]:

- выбор критериев отказа для функций каждого вида, выполняемых в различных режимах работы объекта;
- определение состава (номенклатуры) показателей надежности функций системы;
- установление требований к необходимым значениям показателей надежности функций;

– получение проектных (расчетных) оценок уровня надежности системы;

– принятие и реализация решений о применении в системе специальных мер повышения надежности (при необходимости);

– получение экспериментальных оценок показателей надежности системы (при необходимости).

Оценка надежности при наличии рисков является обязательной при внедрении автоматизированных систем на газоперерабатывающих предприятиях.

При идентификации рисков проекта модернизации конкретного СПГ-терминала целесообразно использовать критерии, которые следуют непосредственно из целей, стратегии и задач модернизации. При этом проекты модернизации, получающие высокую оценку с позиции одних целей, стратегий и задач, могут не получить ее с точки зрения других критериев эффективности [4].

Были выделены группы критериев эффективности, которые приведены в табл. 2.

Для решения задачи модернизации газовых терминалов требуется учитывать обобщенный критерий по комплексу вышеприведенных параметров. Метод многокритериальных оценок позволяет учитывать те условия и показатели качества, которые в дальнейшем будут способствовать нахождению эффективно-го решения задачи.

На рис. 1 представлена диаграмма изменения значений критериев эффективности ПАО «НК «Роснефть» в области модернизации СПГ-терминалов за 2018–2020 г. Алгоритм многокритериальной оценки эффективности проектов модернизации СПГ-терминалов представлен на рис. 2.

Таблица 2. Основные группы критериев эффективности

Общий критерий	Частные критерии
Технологический К1	1. Объем переработки газа 2. Слабое техническое оборудование 3. Коэффициент сложности Нельсона 4. Технологический уровень производства
Экономический К2	5. Снижение роста предложений на рынке 6. Девальвация рубля 7. Уменьшение остатков денежных средств, задолженности 8. Повышение курса доллара и евро
Экологический К3	9. Выбросы в атмосферу диоксида углерода CO ₂ 10. Выбросы парниковых газов, сбросы сточных вод в акваторию

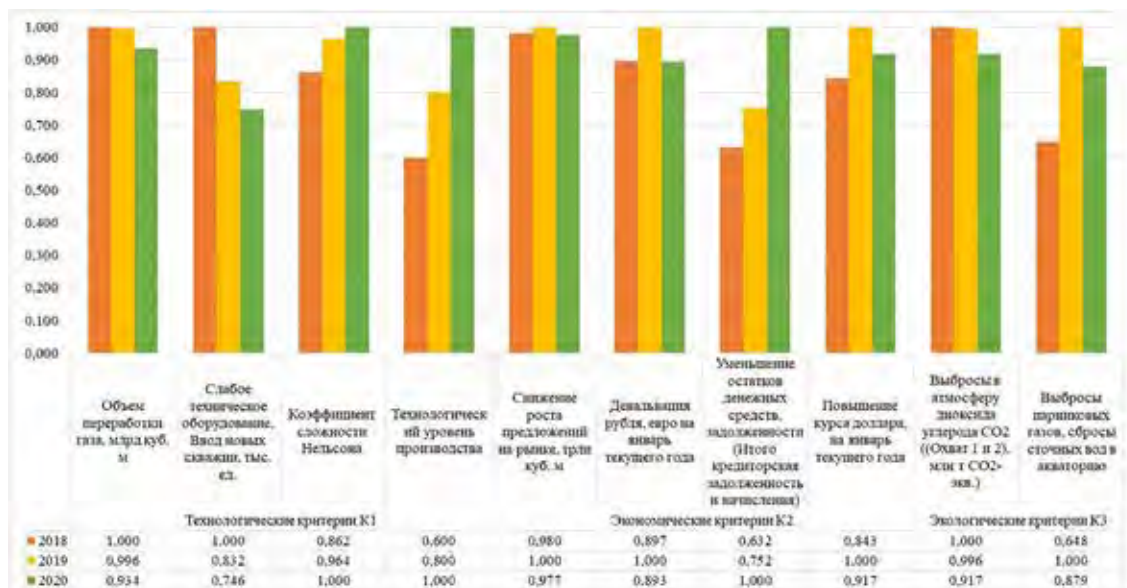


Рис. 1. Диаграмма изменения значений критериев эффективности

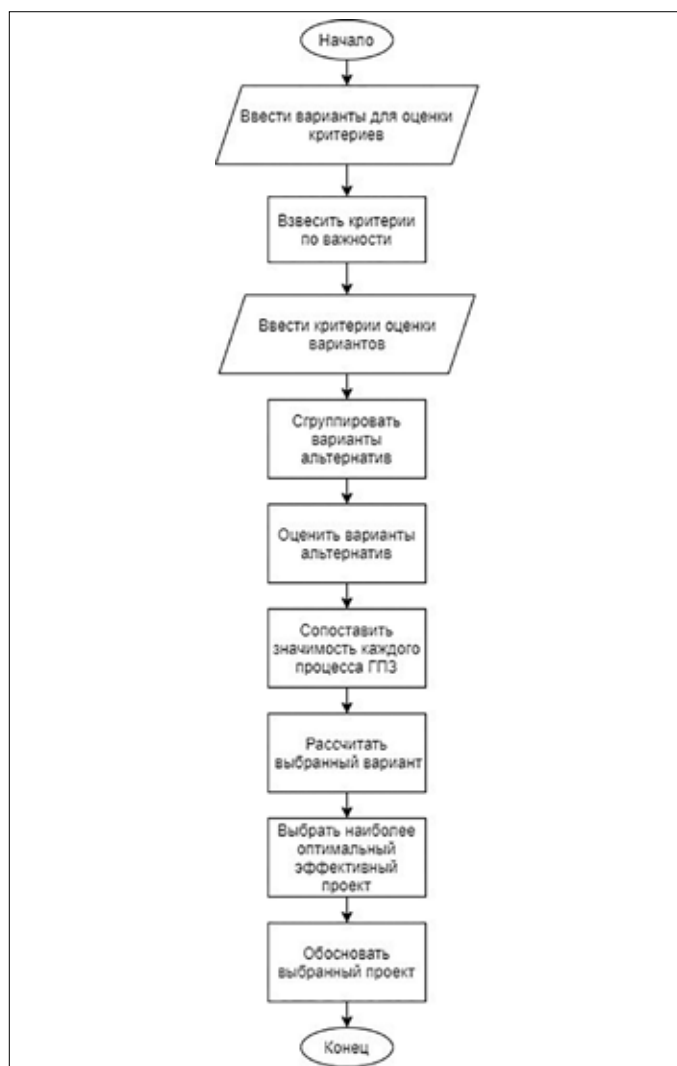


Рис. 2. Алгоритм многокритериальной оценки эффективности проектов модернизации

Таблица 3. Результаты расчетов целевой функции аддитивного критерия

Год	Значение целевой функции	Рейтинг
2018	-0,2739852	2
2019	-0,6518151	3
2020	0,0970462	1

При выполнении многокритериальной оценки предполагается построение математической модели объекта исследования. Формальное описание возможных вариантов и их последствий проводится с целью получения наилучшей альтернативы. Важность критериев определяется на основе ответов экспертов и лица, принимающего решение в зависимости от конкретной ситуации. По каждому из используемых критериев выставляются числовые значения для сравнения векторных оценок, которые упорядочены по предпочтительности. Если некоторое значение критерия для рассматриваемого варианта больше другого, то оно является предпочтительным. Помимо оценок выставляется положительность и отрицательность критериев. Например, чем больше объём переработки газа млрд. куб. м, тем лучше. Критерии могут иметь различную значимость и указываются в процентах, где 100 % – абсолютная значимость.

На основе анализа ряда критериев оптимальности был выбран аддитивный критерий, целевая функция которого определяется следующим образом (1):

$$A_i = \sum_{i=1}^n d_i \cdot n_i, \quad (1)$$

где d_i – весовой коэффициент, определяющий степень предпочтения i -го показателя по сравнению с другими; n_i – нормированное значение показателя i -го критерия.

Для расчета аддитивного критерия необходимо привести значения к нормализованному виду. Максимальное значение при этом равно единице, а оставшиеся – варьируются от нуля до единицы. Далее учитывается положительность и отрицательность критерия.

Результаты расчетов целевой функции аддитивного критерия деятельности компании ПАО «НК «Роснефть» в области модернизации СПГ-терминалов за

2018–2020 годы приведены в табл. 3. Чем выше абсолютное значение критерия, тем более полноценно проводятся научно-технические работы.

Таким образом, на основе результатов расчёта целевой функции формируется рейтинг, который характеризует ожидаемую в будущем тенденцию повышения эффективности и надёжности работы СПГ-терминалов при внедрении автоматизированных систем управления на газоперерабатывающих предприятиях.

Библиографический список

1. Годовой отчет 2019 ПАО «НК «РОСНЕФТЬ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [//www.rosneft.ru/docs/report/2019/ru/results.html](http://www.rosneft.ru/docs/report/2019/ru/results.html).
2. Драпак К.А., Крылов Е.Г., Капитанов А.В. Анализ и оценка рисков СПГ-терминала с помощью диаграммы рисков // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 2 (57). С. 37–43.
3. Драпак К.А., Кадыгрова Т.С., Крылов Е.Г., Капитанов А.В. Оценка уровня надежности защиты регазификационного терминала // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2021. № 3 (250). С. 54–56.
4. Золотухина Т.В. Многокритериальный анализ модернизации нефтеперерабатывающего производства // Научно-информационный журнал «Экономические науки». 2013. № 7 (104). С. 44–48.

Драпак Кристина Алексеевна – инженер кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «ВолГТУ»

app@vstu.ru

Крылов Евгений Геннадьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «ВолГТУ»

app@vstu.ru

Капитанов Алексей Вячеславович – д-р техн. наук, зав. кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

av.kapitanov@stankin.ru

Drapak Kristina Alekseevna – engineer at the sub-department of «Automation of Production Processes» of FSBEI HE «VolgSTU»

app@vstu.ru

Krylov Evgeniy Gennadievich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Automation of Production Processes» of FSBEI HE «VolgSTU»

app@vstu.ru

Kapitanov Alexey Vyacheslavovich – D.Sc. of Engineering, head of the sub-department of «Automated information processing and control systems» of MSUT «STANKIN»

av.kapitanov@stankin.ru

ВЫБОР МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО РАЗМЕРА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ КООРДИНАТНЫМ МЕТОДОМ

METHOD SELECTION FOR MEASURING THE LINEAR SIZE OF A CYLINDRICAL DETAIL BY THE COORDINATE METHOD

Проведено исследование методик измерения линейного размера на координатно-измерительной машине. Приведены результаты оценки погрешности определения линейного размера при сравнении средней и прилегающей окружностей, а также определение размера по двухточечной схеме измерения и построение наклонного и прямого цилиндров.

A study of methods for measuring linear dimension on a coordinate measuring machine has been carried out. The error estimation results in determining the linear dimension when comparing the average and adjacent circles, as well as determining the dimension using a two-point measurement scheme and constructing inclined and straight cylinders are presented.

Ключевые слова: методика измерения, линейный размер, координатно-измерительная машина, средняя и прилегающая окружности.

Keywords: measuring methods, linear dimension, coordinate measuring machine, average and adjacent circles.

С развитием техники и технологий в приборостроении, машиностроении, авиастроении и других областях науки большое внимание уделяют контролю точности деталей, а это значит, что требования качества изготовления деталей постоянно повышаются [1–3].

Автоматизация процесса измерения геометрических параметров деталей позволяет измерять их более точно и эффективно. Всё это возможно благодаря применению современных измерительно-вычислительных комплексов и координатно-измерительных машин (КИМ) [4].

Действительный размер готовой детали всегда будет отличаться от номинального размера. Величина отклонения будет зависеть от технологии изготовления детали, неточностей способов обработки деталей и квалификации рабочего. Для определения действительного размера детали руководствуются международными и национальными стандартами. Существенное влияние при координатных методах измерения будет оказывать методическая погрешность измерения [5–7].

Международный стандарт ИСО 286-1:2010 устанавливает систему допусков на линейные размеры, применимую к двум типам геометрических элементов: цилиндр и две параллельные противоположные плоскости. Основное назначение этой системы – обеспечение взаимозаменяемости деталей в сборочных единицах и изделиях.

Первоначально для интерпретации размера размерного элемента применялось требование прилегания (размер по сопряжению ограничен пределом максимума материала, а любой местный размер ограничен пределом минимума материала), однако положение стандарта ГОСТ 25346-2013(ISO 286-1:2010) [8] изменили эту интерпретацию на правило двухточечного измерения (любой местный размер ограничен верхним и нижним предельными размерами). Это означает, что при задании допуска размера по умолчанию на отклонения формы теперь не накладывается каких-либо ограничений.

Целью данной работы является исследование способов определения линейного размера (диаметра) цилиндрической детали по старому и новому стандартам на координатно-измерительной машине и сравнение этих результатов.

В данной работе были проведены координатные измерения на координатно-измерительной машине DEA GLOBAL 05.05.05 цилиндрической детали (Ø25e8) в пяти сечениях.

Положения прилегающей и средней окружностей в сечениях определяли при помощи программного обеспечения КИМ DEA Global и математического аппарата решения задач минимизации в среде Microsoft Excel.

Результаты полученных диаметров в пяти сечениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений

№ сечения	Прилегающая окружность, мм	Средняя окружность, мм	Предельные размеры для Ø25e8, мм		По старому стандарту	По новому стандарту
			dmax	dmin		
1	24,973	24,945	24,960	24,927	не годен	годен
2	24,949	24,942			годен	годен
3	24,943	24,938			годен	годен
4	24,946	24,935			годен	годен
5	24,939	24,930			годен	годен

При определении годности вала с номинальным размером Ø25e8 по прилегающей окружности для первого сечения действительный размер диаметра больше наибольшего предельного размера. Следовательно, вал не годен. А в соответствии с действующими стандартами (по средней окружности) размеры диаметров не выходят за границы допуска, и это значит, что вал считается годным по всем пяти сечениям.

Основным условием в машиностроении является обеспечение собираемости деталей, где взаимодействие поверхностей происходит по прилегающим элементам. По новому стандарту деталь считается годной, как показывают результаты, но сборку осуществить не удастся.

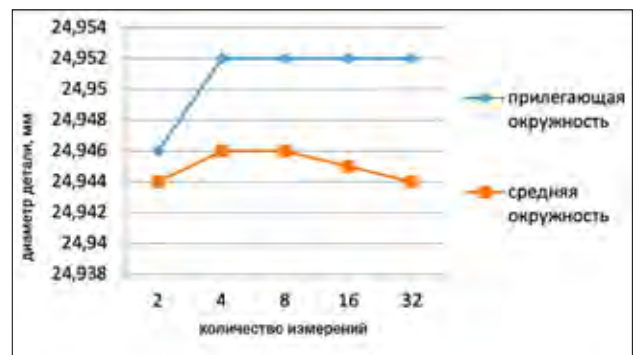
Следующий эксперимент заключался в определении диаметра по двухточечной схеме измерения. В этом эксперименте вычисляли диаметр детали с помощью двухточечной схемы измерения или местный диаметр выявленного элемента, то есть расстояние между двумя противоположными точками элемента. Было проведено разное количество измерений в 5 сечениях. При этом определяли, как изменяются размеры диаметров с уменьшением числа точек в 2 раза.

Диаметр, определённый по принципу прилегания, вычисляется как наибольшее из результатов измерения диаметров детали по двухточечной схеме измерения, а диаметр средней окружности – как среднее арифметическое диаметров измеренного профиля.

Диаметр, определённый по принципу прилегания, сильно зависит от количества измерений (рис. 1). Сравнивая результаты вычисления диаметров, видно, что они в среднем отличаются на 8 мкм. А диаметры средних окружностей различаются не более чем на 1 мкм.

Эксперимент показал, что для нахождения диаметра, определённого по принципу прилегания, двух измерений диаметров недостаточно. Необходимо четыре или более измерений.

Сечение № 1



Сечение № 3

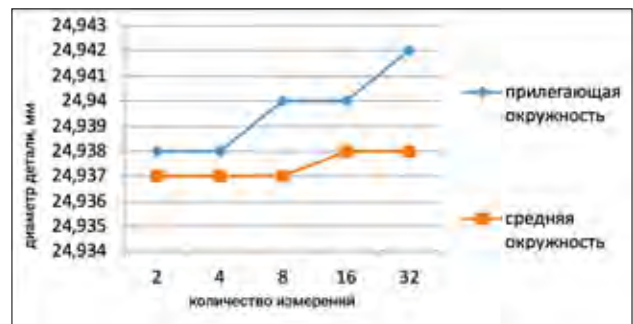


Рис. 1. Сравнение результатов вычислений

Следующий эксперимент заключался в определении диаметра детали не по отдельным сечениям, а путём построения наклонного и прямого цилиндров.

Для определения диаметра цилиндра с помощью программного обеспечения КИМ DEA Global и математического аппарата Excel были найдены положения прилегающего цилиндра с учетом наклона и без учёта наклона и, аналогично, среднего цилиндра с наклоном и без него.

Положение прилегающего цилиндра, наклоненного под углом, описанного вокруг профиля, определяется как решение минимизационной задачи:

$$R_0 \rightarrow \min, \text{ при } R_0 - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \geq 0 \quad (1)$$

$$x_0 = z_0 + z \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

$$y_0 = z_0 + z \cdot \cos\gamma \quad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты центра цилиндра, x_i и y_i – координаты точек профиля, R_0 – радиус прилегающего цилиндра, угол φ и угол γ – углы наклона прилегающего цилиндра к оси X и к оси Y соответственно.

Средний цилиндр определяется по методу наименьших квадратов. При наличии массива точек профиля, полученного по результатам измерений, коэффициенты уравнения средней окружности можно определить из решения задачи минимизации суммы квадратов:

$$\sum_{i=1}^n \left[R_{0cp} - \sqrt{(x_i - x_{0cp})^2 + (y_i - y_{0cp})^2} \right]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

$$x_{0cp} = z_0 + z \cdot \cos\varphi \quad (5)$$

$$y_{0cp} = z_0 + z \cdot \cos\gamma \quad (6)$$

где x_{0cp}, y_{0cp}, z_0 – координаты центра, R_{0cp} – радиус среднего цилиндра, x_i и y_i – координаты точек профиля, n – количество точек профиля.

Радиусы прилегающего и среднего цилиндров без учета наклона определяли аналогично, только углы φ и γ были приняты равными 90° , т. е. считали, что профиль исходного цилиндра перпендикулярен оси Z . Результаты вычисления диаметров приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что при определении диаметров по прилегающему профилю угол наклона цилиндра влияет на значение диаметра и разность составляет $0,003$ мм, а при вычислении по среднему профилю значения не различаются. Следовательно, при определении диаметра по средней окружности угол наклона цилиндра не будет значительно влиять на результаты измерений линейного размера.

Таблица 2. Результаты вычисленных диаметров цилиндров

	Диаметр прилегающего профиля, мм	Диаметр среднего профиля, мм
Измерение диаметра по отдельным сечениям	24,958	24,938
Измерение диаметра при наклонном цилиндре	24,955	24,938
Измерение диаметра при прямом цилиндре	24,958	24,938

Погрешность при измерении диаметра детали зависит от многих факторов, одним из основных является методика определения размера. В данной работе проводилось сравнение определения размера по прилегающей и по средней окружностям. Выбор базы для отчета зависит от конструктивного назначения детали. Без этой информации нельзя точно сказать, по какой из окружностей (прилегающая или средняя) следует определять действительные значения размеров детали. Проведен эксперимент по определению размера детали по двухточечной схеме измерения, значения прилегающих диаметров приблизительно равны при измерении 32, 16, 8 и 4-х диаметров, а при двух наблюдается уменьшение результата. Следовательно, при измерении диаметра линейного размера необходимо проводить не менее 4-х измерений. Построение наклонного цилиндра практически не уменьшает методическую погрешность и при этом требует больших вычислений.

Библиографический список

1. Григорьев С.Н., Телешевский В.И., Глубоков А.В., Педь С.Е., Глубокова С.В. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27–29.
2. Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Телешевский В.И., Емельянов П.Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56–59.
3. Григорьев С.Н., Конов С.Г. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 9–13.
4. Емельянов П.Н., Педь С.Е., Холин И.Е. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 68–73.
5. Glubokov A.V., Glubokova S.V., Shulepov A.V., Ped S.E. Spectral parameters of straightness deviation evaluation // Materials Science Forum. 2016. Vol. 876. P. 74–79.
6. Педь С.Е. Исследование методической погрешности координатных измерений геометрических параметров деталей машин // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 28–32.
7. Педь С.Е., Дариенко Е.В. Оценка погрешностей координатных измерений параметров сечений цилиндрических поверхностей // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 17–19.
8. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – М.: Стандартинформ, 2014. – 37 с.

Афонина Ирина Викторовна – аспирант кафедры измерительных информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ira.afonina.94@mail.ru

Глубоков Александр Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры измерительных информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

al-glubokov@yandex.ru

Afonina Irina Viktorovna – postgraduate at the sub-department of «Measuring information systems and technologies» of MSUT «STANKIN»

ira.afonina.94@mail.ru

Glubokov Alexandr Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Measuring information systems and technologies» of MSUT «STANKIN»

al-glubokov@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ

AN AUTOMATED SYSTEM OF GENERATING AND PROVIDING VERIFICATION DATA OF MEASURING INSTRUMENTS AS A TOOL FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ORGANIZATION'S FUNCTIONING

В статье указано, что на данный момент цифровизация охватывает все большее количество процессов функционирования организации, в том числе и процессы ее метрологического обеспечения. Отмечено, что сведения о проведении метрологического обслуживания средств измерений необходимо передавать в сторонние информационные среды. Проведено сравнение методов формирования и предоставления информации о метрологическом обслуживании средств измерений в сторонние среды с использованием автоматизированной системы и без нее. Выявлены преимущества применения автоматизированной системы, а также указано, что она может быть имплементирована в среду цифрового двойника предприятия.

The article states that at the moment digitalization covers an increasing number of processes of the organization's functioning, including the processes of its metrological support. It is noted that information about the metrological maintenance of measuring instruments must be transmitted to third-party information environments. The methods of forming and providing information about metrological maintenance of measuring instruments to third-party environments using an automated system and without it are compared. The advantages of using an automated system are revealed, and it is also indicated that it can be implemented in the environment of the digital twin of an enterprise.

Ключевые слова: автоматизация, метрологическое обслуживание, цифровизация, средство измерения.

Keywords: automation, metrological service, digitalization, measuring instrument.

На данный момент все возрастающая степень цифровизации и автоматизации деятельности предприятий всех сфер экономики диктует определенные требования к процессам функционирования организации [1]. Цифровизация охватывает все процессы функционирования предприятия, в том числе и метрологическое обеспечение ее деятельности [2]. Это касается как непосредственно процедур поверки приборов, средств измерений, так и процессов нормативного отражения результатов метрологического обслуживания, таких как, например, оформление свидетельств о поверке, предоставлении информации в сторонние нормативно-правовые среды, формирование протоколов и других документов.

Кроме того, с 24 сентября 2020 года, согласно Федеральному Закону № 102 ФЗ «Об обеспечении единства измерений» подтверждение процедуры прохождения прибором поверки верифицируется при помощи записи в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Дан-

ный Федеральный информационный фонд создан с целью обеспечения потребности граждан, общества и государства в получении объективной и достоверной информации о поверке средств измерений. Таким образом, бумажные свидетельства о поверке или извещения непригодности утрачивают свою силу, а подтверждением того, что прибор прошел процедуру поверки, является цифровая запись в указанном Фонде.

В этой связи актуальным является внедрение автоматизированной системы управления деятельностью метрологической службы, которая предоставляет возможности автоматизированного формирования и предоставления информации о проведенном метрологическом обслуживании средств измерения (далее по тексту – СИ) во внешние информационные среды.

Как уже было отмечено, бумажные версии свидетельств о поверке (и извещений о непригодности) на сегодняшний день являются необязательными

для оформления. Однако на многих предприятиях, аккредитованных на право проведения поверки СИ, внутренние нормативные документы устанавливают обязательное оформление бумажных версий как свидетельств о поверке, так и извещений о непригодности. Кроме того, данные документы должны быть оформлены, если заказчик предъявил соответствующее требование. В то же время, сотрудники обязаны после проведения метрологического обслуживания прибора предоставлять информацию о нем во внешние среды. Таким образом, наблюдается повышенная нагрузка на поверителей, ведь информация бумажной версии практически полностью идентична той информации, которая вносится во внешние информационные среды. В этой связи трудоемкость проведения метрологического обслуживания приборов повышается, возрастает вероятность ошибки вследствие многократного повторения монотонных рутинных операций оформления документации по результатам метрологического обслуживания средства измерений.

Для того, чтобы оценить эффект от внедрения автоматизированной системы формирования и предоставления информации о метрологическом обслуживании средств измерений во внешнюю среду в аспекте сокращения временных затрат, смоделируем

ситуацию предоставления одного средства измерения на прохождение процедуры поверки в отдел метрологии предприятия. Для этого воспользуемся таким инструментом, как диаграмма Ганта.

Диаграмма Ганта – это вид столбчатой диаграммы, предназначенный для визуализации последовательности этапов какого-либо процесса и их продолжительности. Диаграмма Ганта позволяет наглядно представить продолжительность каждой из операций процесса, выявить взаимосвязь между операциями и продолжительность всего процесса. Применение указанной диаграммы позволяет наглядно и эффективно визуализировать последовательность операций определенного процесса и их продолжительность.

Таким образом, для процесса формирования и предоставления данных о метрологическом обслуживании СИ без применения автоматизации построим диаграмму Ганта, представленную на рисунке 1.

В целях облегчения анализа примем, что на метрологическое обслуживание сдано одно СИ с признаком «ремонт». СИ поступило в отдел метрологии, где было отправлено на процедуру ремонта. Была подтверждена возможность ремонта, и после его проведения СИ было передано на поверку. По результатам поверки было выявлено, что СИ пригодно к примене-

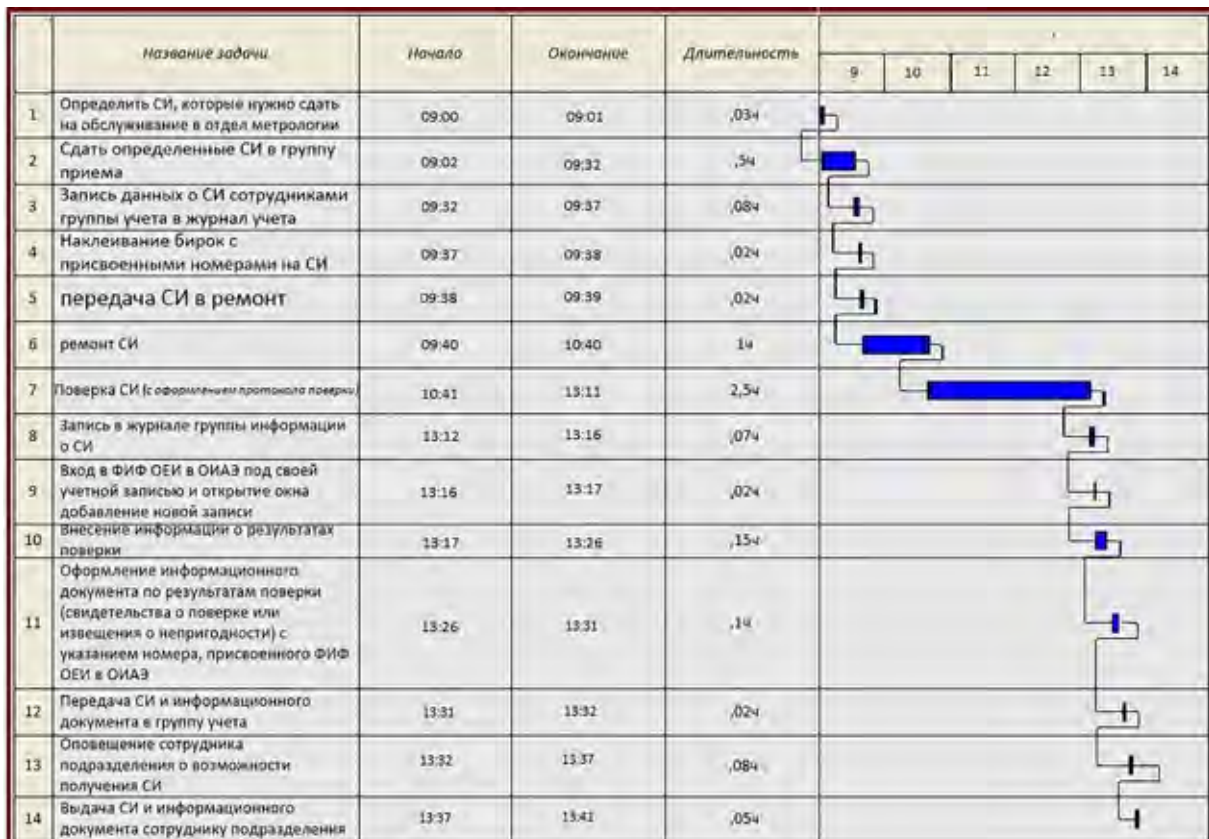


Рис. 1. Диаграмма Ганта метрологического обслуживания средства измерения в отделе метрологии без внедрения системы автоматизации

нию в сфере государственного обеспечения единства измерений. Таким образом, общее время метрологического обслуживания составило 4 часа 41 минуту.

Теперь рассмотрим диаграмму Ганта для процесса формирования и предоставления информации о метрологическом обслуживании СИ при помощи автоматизированной системы. Примем, что условия моделируемой ситуации такие же, как и в предыдущей ситуации. Для такого случая диаграмма представлена на рисунке 2.

Для случая применения автоматизированной системы формирования и предоставления данных о метрологическом обслуживании СИ во внешнюю среду процесс занял 4 часа 30 минут, что выявляет

экономия временных ресурсов для рассматриваемых условий более 10 минут на одно СИ. Это является резервом повышения количества обслуживаемых средств измерения за определенный временной интервал.

Для того чтобы нагляднее визуализировать последовательность взаимосвязей этапов процесса формирования и предоставления данных о поверке СИ с помощью автоматизированной системы, представим процесс метрологического обслуживания в виде нотации вида IDEF0.

Проведение процесса моделирования метрологического обслуживания прибора средствами функционального моделирования нотации IDEF0 служит средством идентификации этапов рассматриваемого

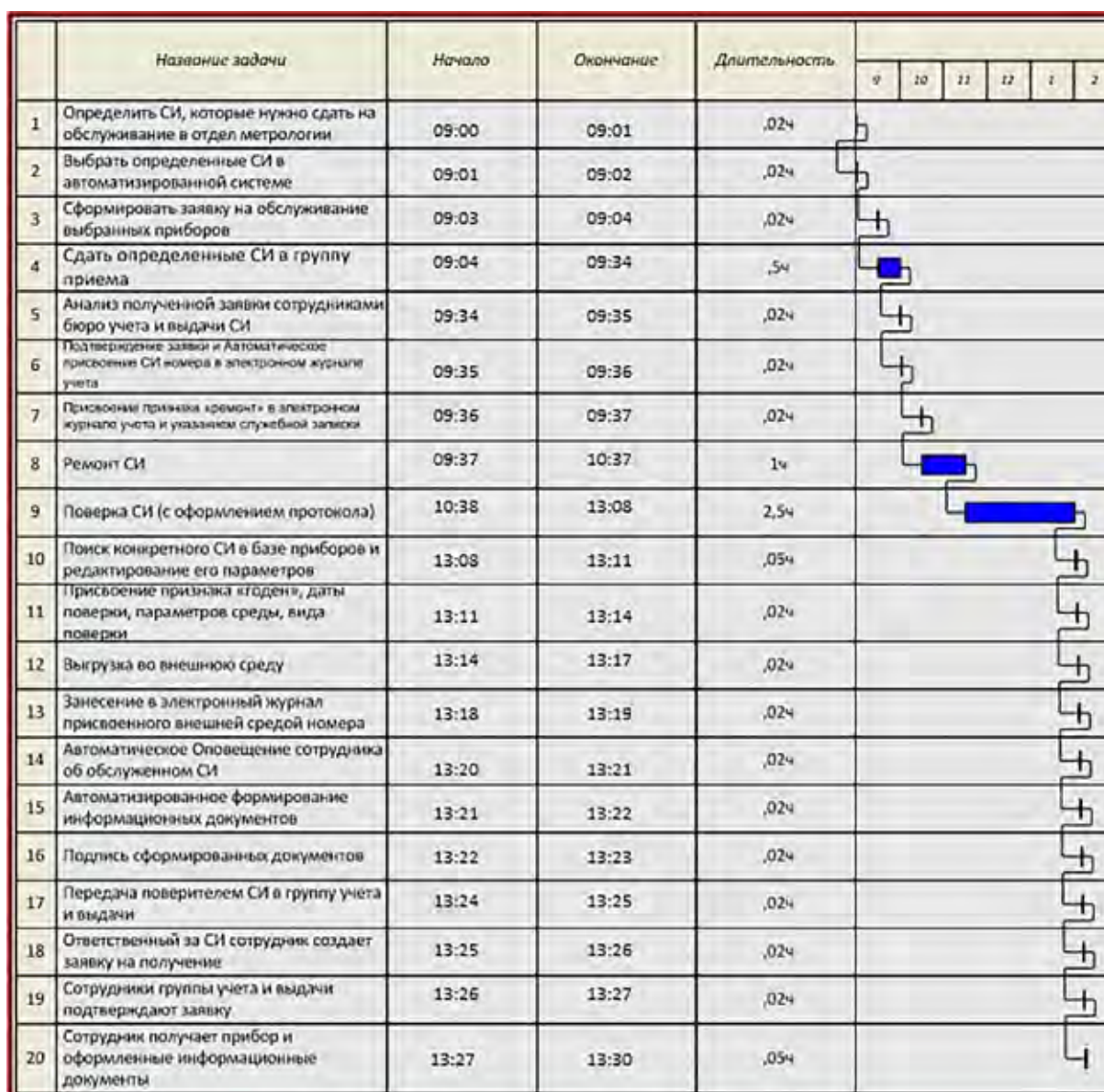


Рис. 2. Диаграмма Ганта метрологического обслуживания прибора при использовании автоматизированной системы формирования и предоставления информации о поверке средств измерения во внешнюю информационную среду

процесса, их последовательности и взаимосвязи, определения механизмов выполнения данного процесса и управляющих воздействий.

Входными данными процесса метрологического обслуживания СИ, как показано на рисунке 3, является непосредственно СИ, которое прошло операцию такого обслуживания, и для второго функционального блока результат поверки СИ. На первом этапе поиск обслуженного СИ производит сотрудник метрологического подразделения. Вторым этапом процесса является выбор данного СИ, после чего открывается электронный журнал поверителя, где последний присваивает статус поверки и другую необходимую информацию. Затем происходит автоматическое формирование файла о метрологическом обслуживании СИ исходя из требований внешней среды, после чего сформированный файл передается в ФИФ ОЕИ. Заключительным этапом декомпозиции является занесение присвоенного внешней средой номера в журнал поверителя, после чего в автоматизированном режиме формируется информационный документ (свидетельство о поверке или извещение о непригодности), который, наряду с записью о результатах метрологического обслуживания, является выходом.

Как уже было отмечено, на настоящий момент развитие цифровых технологий является неотъемлемым трендом научно-технического прогресса во всех сферах [3]. Одним из продуктов цифровизации для предприятий является так называемый цифровой двойник производства [4]. Цифровой двойник позволяет в виртуальном пространстве смоделировать изменение состояния и характеристик изделия, цеха, всего предприятия при изменении характеристик любого из его элементов благодаря тому, что созданная виртуальная трехмерная модель изделия связана с информационной базой данных, в которой каждому элементу можно присвоить дополнительные атрибуты [5]. При передаче информации от автоматизированной системы деятельности отдела метрологии, в цифровом двойнике появится возможность отслеживать статус конкретного СИ, срок истечения межповерочного интервала и другую информацию. В свою очередь, в случае имплементации рассматриваемой автоматизированной системы в единое виртуальное пространство цифрового двойника, сотрудники отдела метрологии могут в реальном времени оценивать метрологические показатели конкретного СИ, анализировать статистику измерений, производимых с его помощью, отслеживать основные диапазоны его экс-

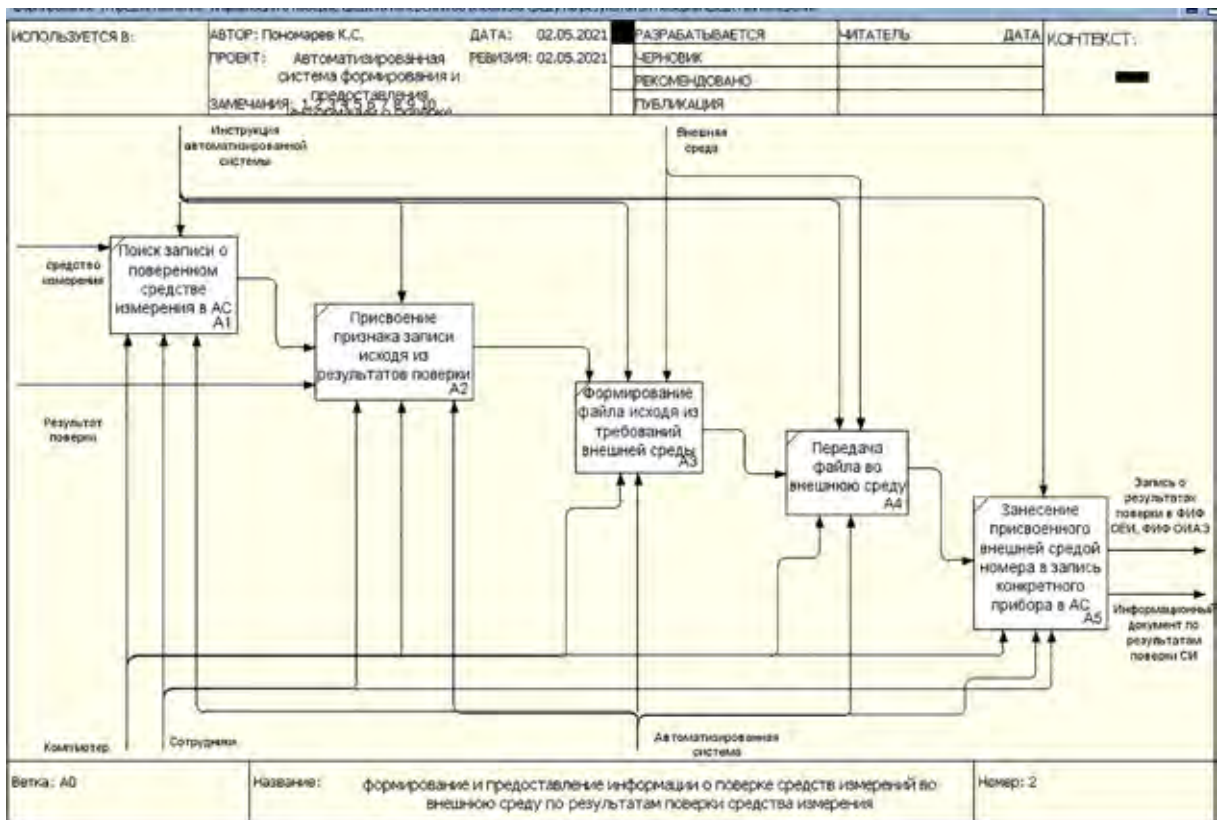


Рис. 3. Диаграмма нотации IDEF0 декомпозиции первого уровня процесса метрологического обслуживания средства измерений при использовании автоматизированной системы формирования и предоставления информации о поверке средств измерения во внешнюю среду

плуатации в целях повышения достоверности проведения процедуры поверки [6]. К тому же, у сотрудника эксплуатирующего СИ подразделения, появится возможность оценить действительные значения погрешностей на конкретных диапазонах путем доступа к протоколу поверки СИ. Такой доступ может быть обеспечен в целях устранения неопределенности в случае, когда СИ, используемое для обеспечения измерения каких-либо параметров, индицирует значение, выходящее за допустимые для такого параметра пределы. Анализируя протокол поверки, сотрудник эксплуатирующего подразделения сможет оценить, действительно ли значение параметра выходит за нормируемые пределы или причина кроется в недостаточной точности применяемого СИ.

Таким образом, внедрение автоматизированной системы формирования и предоставления информации о метрологическом обслуживании средств измерений во внешнюю среду позволит уменьшить временные затраты на формирование и предоставление необходимых данных, снизить влияние человеческого фактора на процессы оформления соответствующей документации по итогам метрологического обслуживания, а также является одним из инструментов повышения уровня цифровизации деятельности предприятия в целом.

Библиографический список

1. **Феофанов А.Н.** Организация виртуального предприятия – будущее производства / А.Н. Феофанов, Е.Ю. Бондарчук, С.А. Тясто // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. – № 3 (46). – С. 101–105.
2. **Пономарев К.С.** Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия / К.С. Пономарев, М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 4 (51). – С. 19–23.
3. **Колчин А.Ф.** Цифровизация и управление жизненным циклом продукции машиностроения / А.Ф. Колчин, С.В. Сумароков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 2 (49). – С. 10–16.
4. **Пономарев К.С.** Цифровой двойник как инструмент развития информационных технологий предприятия / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // Пром-Инжиниринг: труды V Всероссийской научно-технической конференции, Москва–Челябинск–Новочеркасск–Волгоград–Сочи, 25–29 марта 2019 года. – Москва–Челябинск–Новочеркасск–Волгоград–Сочи: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 353–356.
5. **Пономарев К.С.** Цифровой двойник производства – средство цифровизации деятельности организации / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 2 (4). – С. 11–17. – DOI 10.30987/article_5cf2d1c56f8944.09486334.
6. **Пономарев К.С.** Стратегия цифрового двойника производства как метод цифровой трансформации предприятия / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // Вестник современных технологий. – 2019. – № 4 (16). – С. 23–30.

Пономарев Кирилл Сергеевич – аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
sergej.ponomarev@bk.ru

Феофанов Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры инженерной графики ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
feofanov.fan1@yandex.ru

Гришина Татьяна Геннадьевна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
grishena@mail.ru

Ponomarev Kirill Sergeevich – postgraduate at the sub-department of «Automated information processing and control systems» of MSUT «STANKIN»
sergej.ponomarev@bk.ru

Feofanov Aleksander Nikolaevich – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of «Engineering graphics» of MSUT «STANKIN»
feofanov.fan1@yandex.ru

Grishina Tatyana Gennadyevna – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of «Automated information processing and control systems» of MSUT «STANKIN»
grishena@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА SOLVING MILL 2.0 ПРИ СОЗДАНИИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BASIS, FUNCTIONAL CAPABILITIES OF THE SOLVING MILL 2.0 SOFTWARE PRODUCT IN THE CREATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND TECHNICAL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AUTOMATION

Представлена краткая история создания и развития программного продукта Solving Mill 2.0. Даны сведения о теоретической и методологической основе софта. Проанализированы функциональные возможности, ресурсы программного продукта. Даны некоторые сведения о решенных сложных междисциплинарных проблемах при инновационном проектировании в области автоматизации и робототехники. Описан опыт индивидуальной и коллективной работы с софтом бакалавров, магистров, аспирантов в новой Лаборатории ТРИЗ СевГУ.

A brief history of the creation and development of the Solving Mill 2.0 software product is presented. Provides information about the theoretical and methodological basis of the software. The functionality and resources of the software product are analyzed. Some information is given about the solved complex interdisciplinary problems in innovative design in the field of automation and robotics. The experience of individual and collective work with software for bachelors, masters, graduate students in the new TRIZ Laboratory of SevSU is described.

Ключевые слова: теория решения изобретательских задач, алгоритм исправления проблемных ситуаций, менеджер ресурсов, глобально конкурентоспособный инновационный проект.

Keywords: theory of inventive problem solving, algorithm for correcting problem situations, resource manager, globally competitive innovative project.

Введение

В последние годы во многих публикациях можно найти убедительные обоснования того, что выпускники технических и технологических специальностей должны уметь вести инновационную разработку и экспериментальное исследование проблем, связанных с созданием конкурентоспособной отечественной продукции, обеспечивать пополнение и совершенствование базы знаний национальной технологической среды, ее безопасности. Всё более явной становится тенденция роста значимости таких знаний, умений и навыков, которые формируют изобретательское мышление инженерных кадров [1–5].

Как никогда актуальными становятся задачи повышения результативности человеко-машинных систем, обеспечивающих эффективный поиск концептуальных изобретательских решений в процессе работы над инновационными проектами автоматизации аппаратных средств и систем. Это соответствует

программе подготовки аспирантов по таким научным специальностям как 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)» и близких к ним. В этих программах рекомендовано введение дисциплин, направленных на получение студентами компетенций, обеспечивающих нетривиальное изобретательское мышление. Эти программы должны базироваться на мировом опыте применения теоретических основ, методов и алгоритмов интеллектуализации решений прикладных задач не только в области автоматизации и управления технологическими процессами, робототехники, но и во множестве исследований междисциплинарного характера.

Создание радикально новых, прорывных технологий и систем автоматизации технологических процессов, резкие сдвиги в процессах разработки устройств и способов на уровне патентов в таких сферах, как робототехника, новые материалы, аддитивные

технологии требуют кардинальной перестройки мышления изобретателей. Всё более актуальными становятся умения и навыки новой технологии мышления в отличие от традиционного МПиО (метода проб и ошибок).

Как известно, прорыв в изобретательском деле совершил Г.С. Альтшуллер в конце 40-х — начале 50-х годов XX века. Он 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 были сформулированы законы развития технических систем и другие важные компоненты ТРИЗ (Теории Решения Изобретательских Задач) [6, 7].

Немногие молодые люди, получившие и получающие высшее и среднее специальное техническое и технологическое образование, знают, что в 80-е годы в Советском Союзе во многих городах были организованы первые в стране школы изобретательского творчества, общественные университеты научно-технического творчества. Общее число таких школ превышало 500. В 1970 году была создана в Баку (СССР, Азербайджан) Школа молодого изобретателя, которая в 1971 году переросла в АзОИИТ (Азербайджанский общественный институт изобретательского творчества) — первый в мире центр обучения ТРИЗ.

Образованию этой уникальной системы обучения изобретательскому творчеству наша страна была обязана Генриху Сауловичу Альтшуллеру (псевдоним — Генрих Альтов) — автору ТРИЗ-ТРТС (теории решения изобретательских задач — теории развития технических систем), автору ТРТЛ (теории развития творческой личности), изобретателю, писателю. Изучив десятки тысяч патентов и авторских свидетельств, объединив в единую систему существовавшие до него методики и подходы, он открыл основные принципы изобретательского творчества и показал, что процесс создания изобретений в значительной степени управляем [6, 7].

Когда ТРИЗ только появилась, казалось, что инженеров достаточно познакомить с ее инструментарием, чтобы они начали активно применять новые методики на уже существующих рабочих местах, в НИИ и конструкторских бюро. Выпускались первые учебники, ТРИЗ пропагандировалась на семинарах для ИТР и в кружках технического творчества молодежи. Разрабатывались программные продукты, автоматизирующие рутинные элементы работы изобретателя. Однако далеко не каждый специалист, прочитавший книжку о ТРИЗ или побывавший на специализиро-

ванном семинаре, оказался готов использовать ТРИЗ на практике. И все же инженеры, которым удалось не на словах, а на деле войти в ТРИЗ-сообщество, упорно развивали и популяризировали инструменты изобретательского поиска. Благодаря их усилиям начала формироваться особая профессиональная роль — решатель изобретательских задач [8, 9].

1. Краткая история создания и развития программного продукта Solving Mill 2.0.

Разработанные Г.С. Альтшуллером инструменты поиска изобретательских решений, такие как алгоритм АРИЗ-85 и другие, были хороши как для решения задачи, так и для обучения. Однако навешивание на алгоритм этих двух различных функций привело к его переусложнению. Хотя это было вполне приемлемо для ручной работы, но мало подходило для создания софта, где очень важна сухая алгоритмичность, и трудно запрограммировать работу мысли.

Таким образом, перед разработчиками тризовского софта стояло две задачи:

✓ Первая и главная — это создание, продумывание эффективного, логичного и простого процесса решения задачи, который хорошо поддавался бы программированию;

✓ Вторая — это собственно программирование, построение компьютерной структуры тризовского алгоритма и набора эвристических инструментов, обеспечение диалога с пользователем, разработка дружелюбного интерфейса.

Интеллектуальные системы строились на основе выявленных в ТРИЗ объективных законов развития технических систем [9]. 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. Применение тризовского софта помогает инженеру, конструктору, технологу в решении сложных изобретательских задач, в том числе при проведении функционально-стоимостного анализа.

Дальнейшее развитие тризовских софтов шло рука об руку с совершенствованием компьютерных технологий. Так, существенно развилась возможность получения информации, необходимой для решения изобретательских задач. Это значительно усилило решательные возможности софтов, ведь можно найти массу аналогов, которые можно применить для решения задачи. Эта возможность, безусловно, полезная, подкрепляется развитием логической части софтов. Интересно, что здесь в полной мере проявляется закон неравномерности развития частей системы — развитие программ для поиска информации не всегда сопровождается усилением логической части.

Сейчас наблюдается тенденция позиционирования изобретательских софтов. Так, например,

продукты проекта *Invention Machine* и компании *Ideation* – это сложные дорогостоящие программы, которые по силам приобрести только большой компании или университету. Для обычного пользователя эти софты недоступны по стоимости, а функциональность их чрезмерна. Кроме того, эти софты существуют только на английском языке и поэтому малополезны для русскоязычного пользователя.

Кроме решательных софтов, существуют специальные софты для обучения ТРИЗ. Чаще всего, подход разработчиков состоит в том, что они рассматривают тризовский учебный софт, как средство программно-ориентированного обучения. То есть, обучаемому дается информация по разделам, в основном по инструментам ТРИЗ, почитав которую, человек должен ответить на вопросы по тексту. В конце обучения «пройденная» информация должна объединиться в алгоритм решения задачи. Даже при самых благоприятных обстоятельствах обучаемый получает только знания о ТРИЗ, трениговая составляющая – минимальна, что совершенно недостаточно для выработки навыка решения изобретательской задачи.

Специалистам хорошо известно семейство систем «Изобретающая машина» (ИМ). Это программный продукт, предназначенный для поддержки решения сложных инженерно-изобретательских задач. Поддержка может осуществляться на самых ранних стадиях проектирования техники, когда производится выбор принципов действия и архитектуры будущей машины, устройства. Софты можно также применять при решении задач, возникающих при совершенствовании уже существующих устройств, машин, технологических процессов. Теоретической основой и базой знаний системы ИМ является ТРИЗ.

Основное достоинство и особенность рассматриваемой системы состоят в независимости заложенных в систему принципов от области техники.

Законы развития технических систем, принципы разрешения противоречий и методы управления мышлением конструктора одинаково эффективно работают везде, поэтому семейство «Изобретающая машина» применялось в любой области техники, связанной с обработкой веществ и полей, например, в машиностроении, электротехнике, микроэлектронике и т. д. [10].

Это подтверждается опытом эксплуатации системы на предприятиях различных отраслей: машиностроения, металлургии, электроники, химического машиностроения, самолетостроения, медицинской техники, строительства и др.

В целом система занимает самый верхний уровень в иерархии САПР. Развитие обычных САПР идет в сторону элементарной интеллектуализации, что приводит к появлению некоторых свойств, присущих экспертным системам (автоматическая генерация диалога, пояснение логического вывода и т. п.). «Изобретающая машина» развивается по пути более полного усвоения теории развития технических систем,

а также навстречу обычным САПР. В целом систему можно отнести к классу систем поддержки творческого мышления. Базу знаний системы составляют методы теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), основные механизмы которой поддаются автоматизации с использованием искусственного интеллекта.

Такой софт хорошо работал с четко сформулированными задачами, но выяснилось, что его аналитическая часть слабовата. Поэтому следующие версии под названием *TechOptimizer* уже содержали элементы функционального и процессного анализа, однако диалог с пользователем был сведен к минимуму. Центр тяжести переносился на использование технической информации и эвристических инструментов.

Дальнейшим развитием идеи было создание новой версии софта – *Gold Fire* [5]. Решательная часть софта не подвергалась значительным изменениям, развитие софта пошло в сторону усиления аналитической части и разработки новых модулей. Были добавлены модули семантического поиска информации и модель работы с пользователем по совместному решению проблем.

Основная проблема существующих софтов вытекает из неосознанного убеждения, что компьютер может изобретать сам, без участия человека. Данная максима приводит к тому, что для софта разрабатывается такая структура, которая по максимуму может работать самостоятельно. Имеет место неявно вербализуемая надежда на то, что компьютер может изобретать сам, поэтому невольно предпринимаются попытки переложить на программу все функции человека-решателя. В то же время приходится учитывать участие человека в работе с софтом. Такое противоречие неизбежно накладывает отпечаток на структуру софта, поскольку совместить эти два типа софта без потери смыслов довольно трудно [5].

Какой же софт должен быть, что нужно современному решателю изобретательских задач? Наверное, можно сказать так: софт не должен конкурировать с человеком, решателем задач. Наоборот, он должен максимально подстраиваться под него и помогать человеку в полной мере раскрыть свои творческие способности. То есть это должен быть софт-собеседник, софт-помощник, ведущий решателя по процессу решения задачи.

2. Программный продукт Solving Mill 2.0., теоретическая и методологическая основа софта.

Исходя из требований к эффективному изобретательскому софту, цель проекта *Solving Mill* – предложить для рынка компьютерную программу, напрямую предназначенную для решения изобретательской задачи от описания проблемной ситуации до получения и оценки идеи решения. Дать пользователю помощника, компетентного и логичного собеседника, который ведет его при решении задачи по эффективному алгоритму, задает нужные вопросы и напоминает, что надо сделать и какую сопутствующую информацию применить.

Идея создания подобной программы не нова, подобный подход – работать непосредственно через алгоритм решения задачи – лежал в истоках известной программы «Изобретающая машина» (версии 1.0 – 1.5). Однако, потом концепция софта была радикальным образом изменена [5, 8, 10].

Компьютерная программа должна быть недорогой, доступной для широкого круга пользователей и в то же время достаточно эффективной. Здесь нужно избежать двух крайностей – не упростить софт до примитивности и не переусложнить его.

Чтобы удовлетворить требованиям простоты, алгоритм должен содержать минимальное количество ключевых, реперных точек, которые надо пройти при решении задачи. Требование сложности удовлетворяется тем, что переход между точками алгоритма может осуществляться самыми разными способами – от простой догадки, до применения самых сложных и эффективных инструментов ОТСМ-ТРИЗ. То есть алгоритм должен пошагово вести решателя от точки к точке, показывая, какой результат он должен получить после каждого шага.

Методы выполнения шагов конкретизируются в каждом конкретном случае. Такой алгоритм представляет собой фрактальный кластер, древовидную структуру (рис. 1).

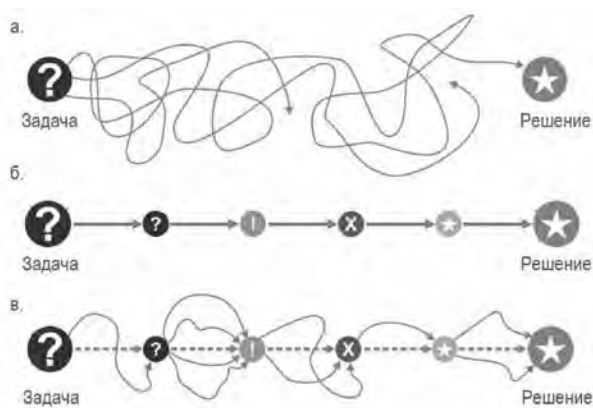


Рис. 1. Разные подходы к решению задачи: а) неорганизованный процесс; б) жестко детерминированный алгоритм; в) фрактальный алгоритм [5]

Переходы между точками подразумевают наличие мини-алгоритмов применения инструментов ОТСМ-ТРИЗ и правил выполнения дополнительных шагов. Мини-алгоритмы можно уточнять и развивать до бесконечности, стараясь закрыть все основные типы решаемых задач, но основные шаги алгоритма при этом не меняются.

Такое понимание процесса решения изобретательской задачи и было положено в методологическую основу алгоритма исправления проблемных ситуаций АИПС [5, 8, 9].

Алгоритм был протестирован на компаниях SAMSUNG и POSCO (Южная Корея) при многолетней работе с практическими изобретательскими задачами из области микроэлектроники, полупроводников, металлургии, медицины, дисплеев различных типов, производства домашней техники и т.д. Он показал высокую эффективность, и на его основе была разработана компьютерная программа Solving Mill. Это эффективный программный продукт для устранения проблемных ситуаций, простой и лёгкий в обучении и пользовании. Теоретической основой софта является ОТСМ-ТРИЗ. Софт организован так, чтобы направить пользователя к сильному решению наиболее быстрым и результативным маршрутом.

3. Какие задачи решает Solving Mill?

Софт Solving Mill предназначен для поддержки решения нетривиальных технических задач от анализа проблемной ситуации до проверки эффективности полученного решения. Эти задачи могут быть связаны с процессами разработки, производства, хранения, транспортировки, продажи продукции, организации работы предприятия, рекламы и т.п. Алгоритм и инструменты универсальны для проблем из любых областей промышленности, могут применяться для других областей деятельности, где возникают нетривиальные задачи.

Продукт, получаемый при использовании Solving Mill, – это концептуальные решения, направленные на устранение проблемных ситуаций, возникающих при разработке, изготовлении, эксплуатации и утилизации устройства или технологии. Поэтому Solving Mill представляет интерес для таких пользователей, как инженеры, проектировщики, исследователи, технологи, руководители проектов, специалисты инновационных подразделений, патентоведы, руководители компаний и т. п. То есть для всех тех, кто по роду деятельности сталкивается с необходимостью решать нетривиальные задачи.

Отдельная область применения Solving Mill – для организации обучения студентов университетов. Софт становится ядром, вокруг которого легко организовать как учебный процесс, так и практические занятия, причем это можно делать как при контакте с преподавателем, так и дистанционно.

В структуре программы предусмотрен тщательный анализ проблемной ситуации с построением причинно-следственных взаимодействий и выходом на оптимальные инструменты решения задачи. На основе анализа программа обеспечивает построение противоречий и других моделей задач, решение задачи при помощи миниалгоритмов и инструментов, разработанных в ТРИЗ и сопутствующих дисциплинах. Пользователь может усилить полученные решения при помощи линий развития. Поскольку программа Solving Mill предназначена для одной вполне определённой цели – для исправления проблемных

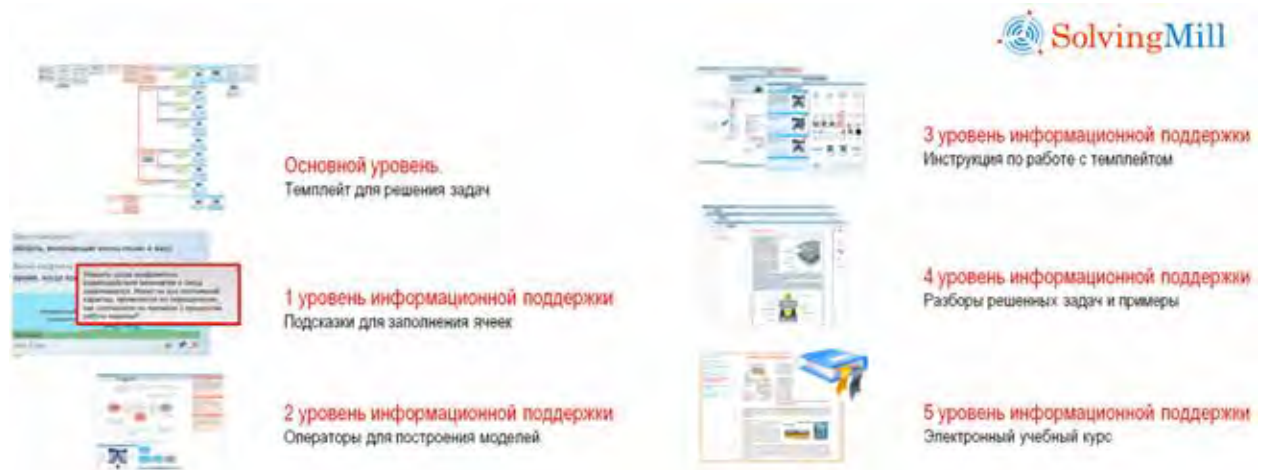


Рис. 2. Уровни информационной поддержки софта Solving Mill [5]

ситуаций – её удалось сделать эффективной, простой и лёгкой в обучении и работе [5, 8].

Главный решательный инструмент Solving Mill – пошаговый темплейт для работы с проблемой, который заполняется по мере продвижения пользователя к решению.

Темплейт организован согласно алгоритму АИПС, адаптированному для программного использования. Пользователь заполняет своеобразную «карту решения»: отвечает на вопросы, заполняет требуемые ячейки, помещает в темплейт описания, иллюстрации, схемы, выводы и другой контент, который генерируется по ходу работы с задачей. Следуя темплейту, пользователь проходит шаг за шагом по всем этапам работы с задачей. Пользователь может легко перемещаться по карте решений, имея возможность детальнее рассмотреть и проработать тот или иной её участок, вернуться назад и исправить ход решения. Благодаря этому при работе пользователь видит и оценивает всю проектную ситуацию: как далеко он продвинулся в решении, есть ли какие-то промежуточные результаты и т. п.

Темплейт содержит 11 шагов, расположенных последовательно по горизонтали. У каждого шага есть своё отдельное поле. В нём даны указания для пользователя о том, что ему нужно делать. К примеру, нужно описать что-то, внести данные в схемы, выполнить действия в операторе, сделать вывод и т. п. Заполненный темплейт даёт полную и наглядную информацию обо всех шагах работы с задачей.

На входе в темплейт пользователь имеет описание проблемной ситуации в свободной форме, по завершению работы он получает ряд идей о том, как решить проблему и улучшить проблемную ситуацию, предложения по внедрению полученных идей, зафиксированный процесс работы над проблемой в виде хорошо

структурированных текстов, рисунков, схем (то есть готовый отчёт по проекту) и заготовку формулы изобретения, которая автоматически формируется на основе зафиксированных данных. При необходимости пользователь может получить помощь, инструкции, подсказки и примеры решённых задач. Для этого основной решательный инструмент – темплейт – имеет пять уровней информационной поддержки (рис. 2).

В случае затруднений при решении задачи и пользовании темплейтом, можно использовать короткие подсказки, которые расположены у каждой ячейки. Подсказка показывает, какая информация нужна программе от пользователя и как корректно представить требуемые данные.

Для выполнения сложных действий и для работы с ТРИЗ-методами есть операторы. Каждый оператор открывается в отдельном окне и имеет свой особый интерфейс. С помощью операторов выполняются вспомогательные действия: построение моделей, обработка получаемой информации, генерация идей и т. п.

Результат работы в каждом из операторов помещается в темплейт, а вся наработанная вспомогательная информация хранится внутри оператора, пользователь имеет к ней доступ в любой момент.

Помимо алгоритма АИПС, в софте использованы известные в ТРИЗ и разработанные авторами софта мини-алгоритмы.

Эти алгоритмы направлены на поддержку решательного процесса: построения модели технической системы; выявления причинно-следственных связей; построения конфликтного взаимодействия в системе; построения и анализа иерархической процессной модели; построения модели вредной системы; выдвижения гипотез устранения конфликта; построения таких моделей задач, как вепольная, техническое и

физическое противоречие и другие; построения требований к ресурсу «неизвестный ресурс – атрибут – описание атрибута»; применение дерева эволюции и линий развития для интенсификации идеи решения и многие другие.

Кроме того, в распоряжении пользователя имеются инструкции, в которых подробно рассказывается, как выполнять каждый шаг алгоритма и пользоваться методическими инструментами. Для более полного понимания особенностей пользования софтом Solving Mill и самостоятельного изучения процесса решения задачи пользователю предлагается учебный курс.

4. Примеры для обучения в составе софта Solving Mill – сквозные кейс-стади по решённым задачам.

Каждый пример выполнен в соответствии с матричной основой софта: строго по шагам темплейта (рис. 3). Это дает возможность лучше понять как процесс решения задачи, так и особенности работы с темплейтом и операторами.

5. Учебный курс						
4. Разборы задач						
3. Инструкции						
2. Операторы						
1. Подсказки						
0. Темплейт						
	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3	Шаг 4	...	Шаг N

Рис. 3. Матричное устройство софта Solving Mill [5]

4.1. Пример кейс-стади (отчёта) по решённой задаче на тему: «Обработка металлических деталей с включениями».

Generator: Solving Mill version sm-2.0.

Опишите проблемную ситуацию в свободной форме

Заготовки, полученные методом литья в землю, подвергаются механической обработке. Проблема заключается в том, что в заготовке присутствуют абразивные включения. При попадании режущего инструмента на включение он ломается.

Необходимо устранить поломку такого режущего инструмента, как фреза.

Метод изготовления заготовок – отливка в форму.

И это при условии, что его менять нельзя.

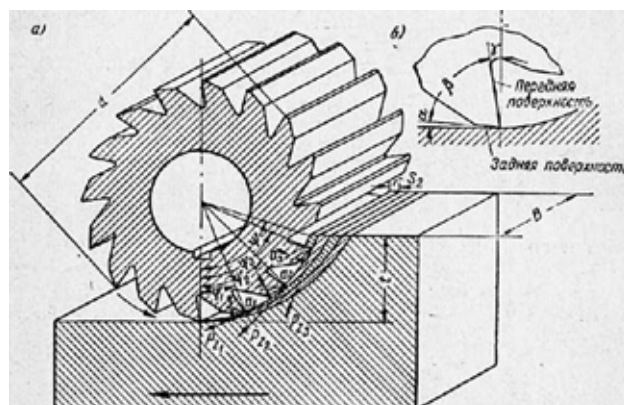
Вы можете сформулировать условие задачи?

✓ Да

Нет

Составьте условие задачи по следующей схеме

Система для обработки металла по поверхностям состоит из станка, фрезы, зажима и обрабатываемой детали. При нормальном ходе дела система работает следующим образом: деталь закрепляется в зажиме, фреза вращается и своими зубьями срезает слой металла.



ме, фреза вращается и своими зубьями срезает слой металла.

При этом возникает проблема, что зубья фрезы натываются на твердые включения и ломаются. Нужно устранить поломки зубьев.

Ограничение: нельзя изменять способ изготовления заготовки.

Определите доступные ресурсы

Пространственные ресурсы (оперативная зона)

Пространство, включающее фрезу и зону резания заготовки.

Временные ресурсы (оперативное время)

Время работы фрезы.

Вещественные ресурсы

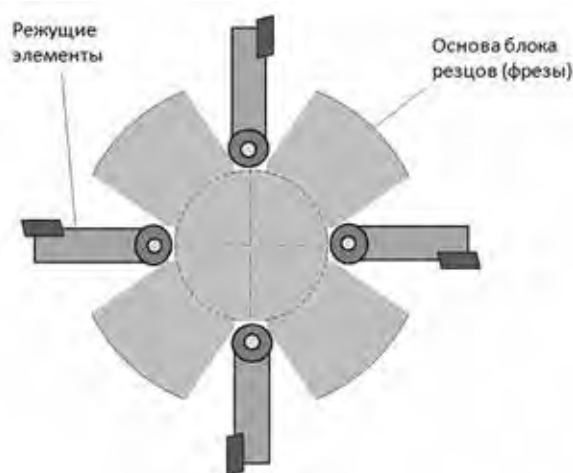
Станок, фреза, зажим и обрабатываемая деталь.

Полевые ресурсы

Электрический ток, энергия вращения фрезы.

Предложите решение задачи наилучшим известным или самым простым способом

Выполнить зубья фрезы в виде резцов и установить их на шарнирах. Тогда при контакте с твердым включением зуб отклонится и не сломается.



Устраивает ли это решение?

Да.

✓ Нет.

Почему не устраивает решение?

Нет вообще минимально приемлемого решения.
Возникают проблемы с требуемым действием.

При реализации решения ухудшается другой параметр системы.

✓ Возникает противоречие к компоненту системы.

Формулировка модели задачи «Физическое противоречие»

Резец должен быть жёстким, чтобы хорошо резать металл.

Резец должен быть шарнирным, чтобы отклоняться при попадании на твёрдое включение.

К какому атрибуту компонента относится требование?

Размер, форма, положение.

Поверхность.

Внутренняя структура, материал.

✓ Динамичность

Управляемость

Выберите тип противоречия:

✓ Противоречивые значения параметра требуются в одном и том же месте.

Противоречивые значения параметра требуются в одно и то же время.

Противоречивые значения параметра требуются в одном и том же месте в одно и то же время.

Выберите подходящее преобразование:

Изменять степени динамичности компонента в зависимости от условий работы

✓ Изменять динамичность частей компонента в зависимости от условий работы

Модель решения

Для разрешения противоречия, связанного с атрибутом динамичность, разнести противоречащие значения параметра во времени: изменять динамичность частей компонента в зависимости от условий работы.

Укажите, как это преобразование может быть применено для решения данной задачи:

Выполнить крепление резца к фрезе шарнирно, но установить X-компонент, который бы не давал резцу отклоняться в нормальных условиях работы, но допускал отклонение назад при попадании на твердое включение.

Требуется ли преобразовать систему?

✓ Да

Нет

Какие атрибуты системы и как нужно преобразовать?

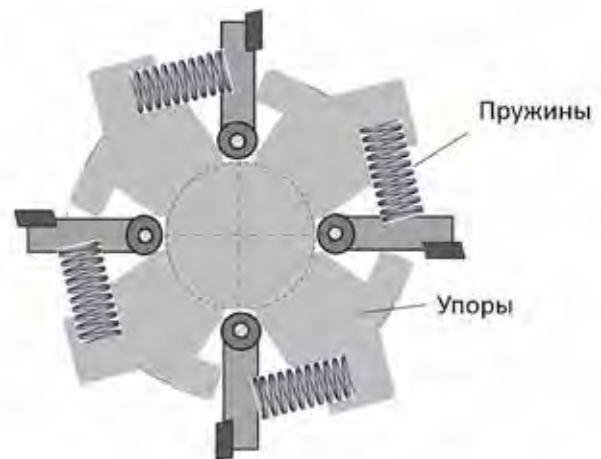
Компоновка

Структура (связи)

Управляемость

Другое

Нужно ввести X-компонент в крепление фрезы. Таким X-компонентом может быть пружина, которая не дает режущему элементу отклоняться назад при нормальной нагрузке, а при встрече с твёрдым включением допускает отклонение назад.



Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да

✓ Нет

Предварительное решение

Для улучшения параметра Сложность перейти от симметричной формы компонента к асимметричной. То есть выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы. Для этого: Выполнить крепление резца к фрезе шарнирно, но установить X-компонент, который бы не давал резцу отклоняться в нормальных условиях работы, но допускал отклонение назад при попадании на твердое включение. Форма: Форма паза для режущего элемента

Данное решение устраивает?

Да

✓ Нет

Почему не устраивает решение?

Нет вообще минимально приемлемого решения.
Возникают проблемы с требуемым действием.

✓ При реализации решения ухудшается другой параметр системы.

Возникает противоречие к компоненту системы

Формулировка модели задачи «Техническое противоречие»

Улучшается параметр «Ударная нагрузка на режущий элемент»

Недопустимо ухудшается параметр «Сложность фрезы»

Выбор инструмента решения

✓ Матрица выбора приёмов Г. С. Альтшуллера.

Оператор ТИ-трансформер.

Выбор приёмов через матрицу Г. С. Альтшуллера

Улучшаемый параметр

Ударная нагрузка на режущий элемент

Типовой параметр 1

Сила.

Что при этом ухудшается?

Сложность фрезы

Типовой параметр 2

Сложность устройства.

10. Предварительное действие

а) Заранее выполнить требуемое действие (полностью или хотя бы частично)

б) Заранее расставить объекты так, чтобы они могли вступить в действие без затраты времени на доставку и с наиболее удобного места.

18. Использование механических колебаний

а) Привести объект в колебательное движение.

б) Если такое движение уже совершается, увеличить его частоту (вплоть до ультразвуковой частоты).

в) Использовать резонансную частоту.

г) Применить вместо механических вибраторов пьезовибраторы.

д) Использовать ультразвуковые колебания в сочетании с электромагнитными полями.

26. Копирование

а) Вместо недоступного, сложного, дорогостоящего, неудобного или хрупкого объекта использовать его упрощенные и дешевые копии.

б) Заменить объект или систему объектов их оптическими копиями (изображениями). Использовать при этом изменение масштаба (увеличить или уменьшить копии).

в) Если используются видимые оптические копии, перейти к копиям инфракрасным или ультрафиолетовым.

35. Изменение физико-химических параметров объекта

а) Изменить агрегатное состояние объекта.

б) Изменить концентрацию или консистенцию.

в) Изменить степень гибкости.

г) Изменить температуру.

Получены идеи с помощью подсказок матрицы

Г.С. Альтшуллера?

Да.

✓ Нет

Выбор инструмента решения

Матрица выбора приёмов Г. С. Альтшуллера.

✓ Оператор ТП-трансформер.

Какой параметр ухудшился?

Сложность

На какой эксплуатационный параметр системы влияет ухудшение указанного параметра?

Производительность.

Надёжность.

Качество продукта.

Адаптивность.

Экономичность.

Управляемость.

✓ Простота.

Для улучшения указанного параметра используйте преобразование:

✓ Преобразовать компонент системы.

Ввести новый компонент в систему.

Преобразовать действие в системе.

Преобразовать систему.

Специальное преобразование.

Уточните способ преобразования:

Разделить компонент на части или увеличить степень дробления.

Отделить от компонента мешающую часть.

Обеспечить нужное свойство в части компонента.

Использовать принцип «наоборот».

Изменить физико-химические параметры компонента.

Обеспечить выполнение компонентом нескольких функций одновременно.

Обеспечить отброс компонента или его частей, которые выполнили свое назначение.

Изменить оптические свойства компонента.

✓ Перейти от симметричной формы компонента к асимметричной.

Объединить однородные или предназначенные для смежных операций компоненты.

Изменить форму компонента на сферическую.

Использовать копию компонента.

Заменить дорогой долговечный компонент дешёвым, поступившись долговечностью

Модель решения

Для улучшения параметра Сложность перейти от симметричной формы компонента к асимметричной.

То есть, выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы.

Какой компонент системы можно преобразовать указанным способом?

Станок.

✓ Фреза.

Зажим и обрабатываемая деталь.

Ни один не подходит.

Какие атрибуты компонента «фреза» и как нужно преобразовать?

Размер

Форма

✓ Форма паза для режущего элемента

Поверхность

Внутреннее пространство

Материал

Динамичность

Управляемость

Другое

Требуется ли преобразовать систему?

Да.

✓ Нет.

Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да.

✓ Нет.

Предварительное решение

Перейти от симметричной формы компонента к асимметричной. То есть, выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы.

Данное решение устраивает?

✓ Да.

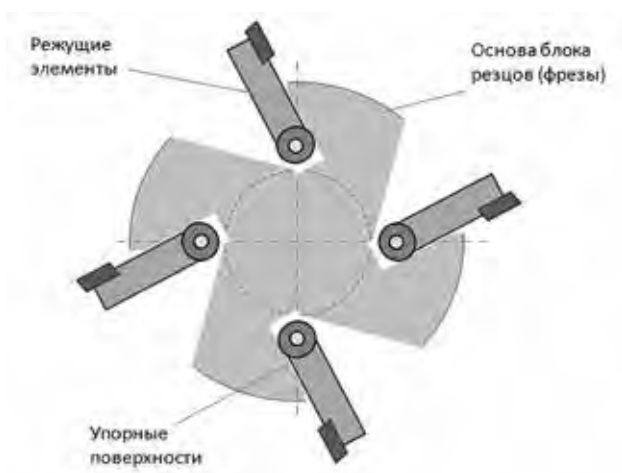
Нет.

Сформулируйте финальное решение

Перейти от симметричной формы компонента к асимметричной. То есть выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы. Это даст возможность заранее отклонить режущий элемент назад. При вращении фрезы центробежная сила будет действовать на него и возвращать элемент назад в радиальное положение.

Это будет аналогично действию пружины, но без применения пружины.

Завершение проекта



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

Пункт 1. Устройство, включающее станок, фрезу, зажим и обрабатываемая деталь, в котором перейти от симметричной формы компонента к асимметричной. То есть, выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы. Это даст возможность заранее отклонить режущий элемент назад. При вращении фрезы центробежная сила будет действовать на него, и возвращать элемент назад в радиальное положение.

Пункт 2. Устройство по пункту 1, в котором выполнить зубья фрезы в виде резцов и установить их на шарнирах. Тогда при контакте с твёрдым включением зуб отклонится и не сломается.

Пункт 3. Устройство по пункту 1, в котором ввести пружину в крепление режущего элемента к основанию фрезы. Пружина не даёт режущему элементу отклоняться назад при нормальной нагрузке, а при встрече с твёрдым включением допускает отклонение назад. Отклонение режущего элемента вперед можно ограничить упорами.

Пункт 4. Устройство по пункту 1, в котором заранее отклонить режущий элемент назад. При вращении фрезы центробежная сила будет действовать на него, и возвращать элемент назад в радиальное положение. Это будет аналогично действию пружины, но без применения пружины.

Пункт 5. Устройство по пункту 1, в котором перейти от симметричной формы компонента к асимметричной. То есть, выполнить паз для режущего элемента не симметричным, а отклоненным назад по ходу вращения фрезы.

Заключение

Подготовка современного инженера, который способен самостоятельно генерировать концептуальные решения актуальных проектов в сферах автоматизации технологий и технических систем, робототехники, мехатроники для обеспечения глобально конкурентных изделий, должна включать базу знаний алгоритмов и программных продуктов, обеспечивающих поддержку процессов корректного формулирования и эффективной реализации процессов инновационного проектирования.

Многолетний опыт творческого сотрудничества кафедры Приборные системы и автоматизация технологических процессов Политехнического института Севастопольского государственного университета и коллектива компании Target Invention (г. Минск, Беларусь) в области систематических инструментов общей теории сильного мышления и теории решения изобретательских задач позволил организовать в 2021 году специализированную лабораторию ТРИЗ. В Лаборатории 20 рабочих мест, которые оснащены доступом к программному продукту Solving Mill 2.0. Это позволяет обеспечить необходимую поддержку студентам и аспирантам при обучении и способствует формированию умений и навыков эффективного поиска прорывных решений сложных проблем с возможностью выхода на уровень изобретений и ноу-хау.

Библиографический список

1. **Соболев А.Н., Некрасов А.Я., Арбузов М.О.** Совершенствование методов подготовки специалистов в области машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2017. № 2 (41). С. 107–111.
2. **Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М.** Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. Цифровое производство, методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад департамента корпоративного обучения Московской школы управления Сколково. 2018. С. 24–43.
3. **Инженерное образование: мировой опыт подготовки интеллектуальной элиты: монография // Рудской А.И., Боровков А.И., Романов П.И., Киселева К.Н.** – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 216 с.

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

5. **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.

6. Официальный сайт Г.С. Альтшуллера. URL: <http://www.altshuller.ru/>

7. **Альтшуллер Г.С.** Найти идею. Введение в ТРИЗ — теорию решения изобретательских задач. Издательства: Альпина Бизнес Букс, Альпина Паблишерз, 2008. — 410 с.

8. **Шпаковский Н.А.** ОТСМ-ТРИЗ. Подходы и практика применения. Издательство: Инфра-М., Москва, — 2018. — 348 с.

9. **Шпаковский Н.А., Новицкая Е.Л.** ТРИЗ. Практика целевого изобретательства. Учебник. — М.: Форум, 2011. — 336 с. — (Высшее образование).

10. **Хоменко Н.Н., Кучерявый Д.П.** «Изобретающая машина» — семейство систем поддержки решения изобретательских задач. URL: https://otsm-triz.org/sites/default/files/ready/im_khomenko_kucheryaviy.pdf.

Карлов Антон Георгиевич — канд. техн. наук, доц. кафедры Приборные системы и автоматизация технологических процессов Политехнического института Севастопольского государственного университета
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 of The Sevastopol state university
antkar38cam@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.91.01

Е.В. Фомин, К.К. Снегирева
E.V. Fomin, K.K. Snegireva

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ АЛЬФА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

PLANNING AN EXPERIMENTAL STUDY CUTTING OF ALPHA TITANIUM ALLOYS

В статье представлена последовательность постановки эксперимента для изучения обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов с точки зрения получения требуемого качества обработанной поверхности. Исследование построено на гипотезе о существовании связи параметров, оценивающих состояние обработанной поверхности – шероховатости, микротвердости и остаточных напряжений, с минимальным значением диссипации подводимой к заготовке энергии. В качестве критерия, оценивающего степень возникающих в материале при резании диссипативных процессов, предложено использовать коэффициент эффективности диссипации энергии, который широко используется в теории и практике обработки металлов давлением для определения режимов устойчивой пластической деформации.

The article presents the sequence of setting up an experiment to study the machinability of cutting alpha titanium alloys from the point of view of obtaining the required quality of the processed surface. The study is based on the hypothesis of the existence of a relationship between parameters that assess the state of the machined surface - roughness, microhardness and residual stresses, with a minimum value of dissipation of the energy supplied to the workpiece. As a criterion for assessing the degree of dissipative processes arising in the material during cutting, it is proposed to use the coefficient of efficiency of energy dissipation, which is widely used in the theory and practice of metal working by pressure to determine the modes of stable plastic deformation.

Ключевые слова: альфа титановые сплавы, металлообработка, планирование эксперимента, обрабатываемость резанием.

Keywords: alpha titanium alloys, metalworking, experiment planning, machinability by cutting.

Альфа титановые сплавы, благодаря большой прочности при низких температурах, хорошей свариваемости, пластичности при гибке и термической стабильности, позволяют получить качественные сварные соединения в большом диапазоне размеров [1]. Высокая коррозионная стойкость и небольшой удельный вес сделали эти сплавы одними из самых распространенных в подводном кораблестроении. Их широко используют в качестве материала для изготовления корпусных конструкций, крепежных деталей, элементов арматуры трубопроводов подводных объектов.

К недостаткам титановых сплавов стоит отнести их низкую обрабатываемость резанием лез-

вийным и абразивным инструментом. Высокое тепловыделение в процессе стружкообразования и низкая теплопроводность обрабатываемого материала приводят к интенсивному износу режущего инструмента, а низкий модуль упругости способствует возникновению вибраций. Указанные физические свойства титановых сплавов становятся причиной возникновения брака, проявляющегося в нестабильном значении шероховатости поверхности по длине изделия при чистовой обработке и в появлении белых пятен при последующем оксидировании. При этом ограничение применения шлифования титановых сплавов делает эту проблему еще более острой.

Целью настоящего исследования является определение рациональных режимов чистовой токарной обработки альфа титановых сплавов, позволяющих добиться требуемого качества поверхности, оцениваемого параметрами шероховатости, микротвердости и остаточными напряжениями поверхностного слоя.

Гипотеза, на которой строится настоящее исследование, заключается в том, что зона пластической деформации ограничена некоторой криволинейной поверхностью вокруг режущей кромки инструмента. Границы этой поверхности могут быть различным образом удалены от геометрического места точек контакта инструмента и заготовки в зависимости от условий резания и параметров процесса. Если установить режим резания, при котором материал не будет успевать полностью рассеивать энергию за счет структурных преобразований или тепла, то наступает макроскопическая неустойчивость пластической деформации [2], которая выражается локализацией в узкой зоне. В таком случае можно предположить, что при обработке резанием это приведет к уменьшению зоны распространения пластической деформации и создаст максимально возможное предварительно напряженное состояние в слоях заготовки, расположенных на пути следования инструмента. Кроме того, важно, чтобы в материале при сложившихся температурно-скоростных условиях не наступили диссипативные процессы восстановления материала по типу динамического возврата и рекристаллизации, существенно снижающих уровень напряжений в материале, придавая ему большую пластичность.

Количество энергии, которое расходуется на диссипативные процессы, можно определить с помощью параметра, который называется «коэффициент эффективности диссипации энергии» η . Он позволяет оценить суммарное действие всех диссипативных процессов при деформации материала [3]. Чем меньше значение указанного коэффициента, тем менее эффективно происходит диссипация энергии в материале и тем больше вероятность локализации деформации, то есть потеря материалом устойчивости.

Таким образом, регулирование величины диссипации энергии, и, как следствие, размера распространения зоны первичной пластической деформации,

позволит управлять параметрами качества обработанной поверхности.

Методика определения режимов, позволяющих гарантировать требуемое сочетание показателей качества обработанной поверхности, построена на определении значений коэффициента эффективности диссипации энергии η и их сопоставлении со значениями параметров качества обработанной поверхности при одних и тех же технологических режимах посредством методов математической статистики.

Коэффициент диссипации энергии η определяется по формуле [4]

$$\eta = \frac{2m}{m+1},$$

где m – показатель скоростной чувствительности, который является функцией касательного напряжения τ и скорости деформации $\dot{\epsilon}$, которые, в свою очередь, можно представить в виде зависимостей [4]

$$\tau = f_1(P_z, k_f, \gamma, S, t),$$

$$\dot{\epsilon} = f_2(k_f, \gamma, \Delta x),$$

где P_z – главная составляющая силы резания, Н; S – скорость движения подачи, мм/об, t – глубина резания, мм; k_f – коэффициент усадки стружки; γ – главный передний угол токарного резца, град.; Δx – толщина переходной пластически деформированной зоны, мм.

В качестве заготовок необходимо использовать предварительно обработанные цилиндрические валики из альфа и псевдо альфа титановых сплавов ПТ-1М, ПТ-3В и 3М по ГОСТ 19807-91. Размеры заготовок, ограниченные возможностями измерительных приборов, используемых в эксперименте, а также условием обеспечения жесткости, представлены на рисунке 1.

Для проведения эксперимента необходим токарно-винторезный станок особо высокой точности модели 16Б16КА. Параметры станка соответствуют требованиям к точности по ГОСТ 18097-93 (ИСО 1708-8-89). Технические характеристики данного станка позволяют варьировать технологические

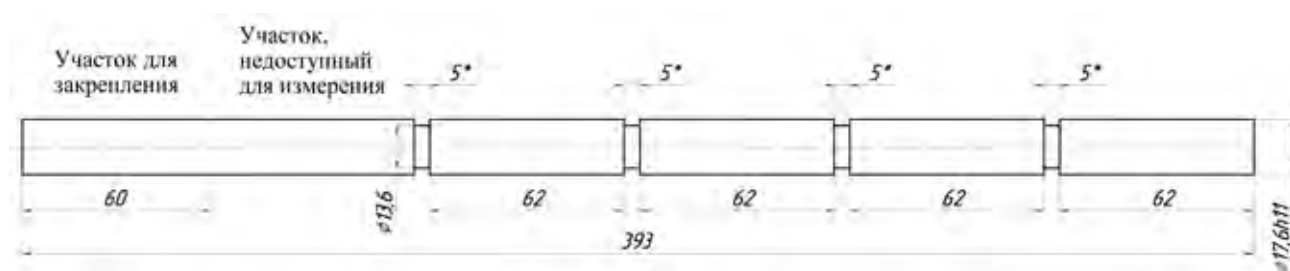


Рис. 1. Размеры заготовки для эксперимента:

* – размеры для справок; неуказанные предельные отклонения – h14, ±IT14/2

параметры в заданном диапазоне значений: скорости вращения заготовки от 40 до 80 м/мин, скорость продольной подачи от 0,1 до 0,5 мм/об.

В качестве инструмента будет использован токарный прямой проходной резец с напаянной пластиной из твердого сплава ВК60М. Он имеет следующие геометрические параметры пластины: главный передний угол 5°, главный и вспомогательный задние углы по 11°, главный угол в плане 91°, вспомогательный угол в плане 10°, угол наклона главной режущей кромки 0°, радиус при вершине 1,0 мм, радиус скругления главной режущей кромки 0,05 мм.

Контроль параметров качества обработанных поверхностей должен выполняться следующими приборами: шероховатость – профилометром модели SJ 201, величина и знак остаточных напряжений – рентгеновским дифрактометром модели «Дрон 4», а микротвердость – микротвердомером модели ПМТ-3М.

Коэффициент эффективности диссипации энергии η определяется расчетным путем. Значения величин, которые входят в состав формулы для расчета указанного коэффициента, определяются экспериментально. Главная составляющая силы резания P_z фиксируется с помощью универсального динамометра модели УДМ-1200, подключенного к анализатору спектра ZET 017. Запись показаний прибора будет выполняться при помощи персонального компьютера с установленным приложением ZETLab в режиме вольтметра постоянного тока. Коэффициент усадки стружки k_f определяется весовым методом, а толщину переходной пластически деформированной зоны Δx планируется определять с помощью металлографического микроскопа типа «Альтами МЕТ 4С» и подключенной к нему окулярной цифровой USB камеры Альтами UCMOS05100KPA.

Таблица 1. Числовые значения условий эксперимента

Факторы	Основной уровень (x_0)	Интервал варьирования	Минимальное значение (код -1)	Максимальное значение (код 1)
Окружная скорость, м/мин, x_1	60	20	40	80
Скорость движения подачи, мм/об, x_2	0,3	0,2	0,1	0,5
Глубина резания, мм, x_3	0,35	0,15	0,2	0,5

Таблица 2. Матрица экспериментального плана 2^3

№	x_0	x_1		x_2		x_3		x_1x_2		x_1x_3		x_2x_3		$x_1x_2x_3$		у
		код	знач.	код	знач.	код	знач.	код	знач.	код	знач.	код	знач.	код	знач.	
1	1	-1	40	-1	0,1	1	0,5	1	4	-1	20	-1	0,05	1	2	
2	1	1	80	-1	0,1	-1	0,2	-1	8	-1	16	1	0,02	1	1,6	
3	1	-1	40	1	0,5	-1	0,2	-1	20	1	8	-1	0,1	1	4	
4	1	1	80	1	0,5	1	0,5	1	40	1	40	1	0,25	1	20	
5	1	-1	40	-1	0,1	-1	0,2	1	4	1	8	1	0,02	-1	0,8	
6	1	1	80	-1	0,1	1	0,5	-1	8	1	40	-1	0,05	-1	4	
7	1	-1	40	1	0,5	1	0,5	-1	20	-1	20	1	0,25	-1	10	
8	1	1	80	1	0,5	-1	0,2	1	40	-1	16	-1	0,1	-1	8	

При выборе факторов эксперимента были проанализированы все параметры процесса резания, которые оказывают наибольшее влияние на состояние обработанной поверхности. Поскольку основной задачей исследования является разработка рекомендаций по выбору режимов чистовой лезвийной обработки альфа титановых сплавов, было принято решение в качестве факторов взять технологические параметры процесса обработки резанием, а именно скорость резания, скорость движения подачи и глубину резания. Граничные значения факторов выбирались по рекомендациям [6], а также по каталогам наиболее востребованных производителей инструментальной техники [7, 8].

Таким образом, планируется провести исследование по схеме полного факторного эксперимента 2^3 . Значения уровней факторов приведены в таблице 1, составленная матрица экспериментального плана – в таблице 2.

Для каждого материала будет проведен отдельный опыт по неизменному плану, приведенному выше.

В результате эксперимента необходимо получить данные, позволяющие установить наличие или отсутствие корреляционной связи между вышеупомянутыми параметрами качества обработанной поверхности и коэффициентом эффективности диссипации энергии. После этого можно будет сделать вывод о верности либо ошибочности выдвинутой гипотезы.

Следует отметить, что подобные исследования уже ранее проводились. По результатам эксперимента удалось подтвердить наличие корреляционной связи между коэффициентом диссипации энергии и шероховатостью обработанной поверхности при обработке точением инструментальных сталей [5]. В работе приводятся результаты эксперимента, позволившего получить численные значения коэффициента эффективности диссипации энергии, по которым были построены графики зависимости данного параметра, шероховатости поверхности, а также температуры резания от скорости деформации. Анализ графического материала показал, что есть вероятность существования корреляционной связи между шероховатостью обработанной поверхности и коэффициентом эффективности диссипации энергии.

Основной целью проведения эксперимента является проверка гипотезы о том, что условия, приводящие к локализации зоны пластической деформации при резании материалов, являются благоприятными для получения наилучшего качества обработанной поверхности. В случае подтверждения гипотезы станет возможным определение режимов чистового точения альфа титановых сплавов, позволяющих добиться требуемого качества обработанной поверхности. Это приведет к:

– сокращению процента брака изделий из дорогостоящих материалов;

– возможности управления процессом механической обработки посредством создания цикла регулирования скорости резания при обработке торцовых, сферических и криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ;

– сокращению времени и трудоемкости доводочных операций за счет качественной предшествующей чистовой лезвийной обработки;

– улучшению качества подготовки поверхностей под последующую сварку или покрытие.

Область применения результатов исследования распространяется на машиностроительные предприятия, занимающиеся созданием надводной и подводной морской техники и широко использующих при их изготовлении титановые сплавы.

Библиографический список

1. **Горьнин И.В.** Титановые сплавы для морской техники / И.В. Горьнин, С.С. Ушков, А.Н. Хатунцев, Н.И. Лошакова. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.: ил.
2. **Prasad Y.U.R.K., Gegel M.L., Doraivelu S.M.** Ctal // Metall. Trans. – 1984. – V. 15. – 1883–1892.
3. **Варгасов Н.Р.** Оптимизация температурно-скоростных режимов деформирования высокопрочных сплавов по критерию диссипации энергии / Н.Р. Варгасов, В.В. Рыбин // Сб. науч. тр. / СПбГТУ. – 2001. – С. 10–22.
4. **Кремлева Л.В.** Методика расчета коэффициента диссипации энергии при резании материалов / К.К. Снегирева, И.В. Ершова // Вестник МГТУ «Станкин». – ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» № 4 (31), 2014. – С. 119–122.
5. **Кремлева Л.В.** Определение оптимальных режимов обработки инструментальных сталей резанием / К.К. Снегирева, И.В. Ершова // Вестник МГТУ «Станкин». – ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» № 1 (32), 2015. – С. 38–40.
6. **Кривоухов В.А.** Обработка резанием титановых сплавов / В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров. – Москва, 1970. – 180 с.
7. Обработка титана: Техническое руководство. SANDVIK Coromant [Электронный ресурс] // AB SANDVIK Coromant. 2011.12. – 136 с. – Режим доступа: <https://www.manualsdir.ru/manuals/407510/sandvik-coromant-obrabotka-titana.html>.
8. Обработка титана: Справочное руководство ISCAR. [Электронный ресурс] // Iscar Ltd. 2013 – 57 с. – Режим доступа: https://www.iscar.ru/Catalogs/publication-2019/machining_titanium_rus_metric.pdf

Фомин Евгений Владимирович – канд. техн. наук, зав. кафедрой технологии металлов и машиностроения Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова
e.fomin@narfu.ru

Снегирева Ксения Константиновна – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова
k.snegireva@narfu.ru

Fomin Evgeniy Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, head of the sub-department of «Metal technology and mechanical engineering» of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
ie.fomin@narfu.ru

Snegireva Ksenia Konstantinovna – postgraduate of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
k.snegireva@narfu.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИМЕР-МЕТАЛЛООКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ СХВАТЫВАНИЯ И ЗАЕДАНИЯ ПРИ ТРЕНИИ НА ПРИМЕРЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СЛОЁВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРОВ МОДУЛЯТОРА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

TECHNOLOGY OF POLYMER-METAL OXIDE COMPOSITES FOR ADAPTIVE PROTECTION AGAINST SETTING AND JAMMING DURING FRICTION ON THE EXAMPLE OF ANTIFRICTION LAYERS OBTAINED BY PLASMA-ELECTROLYTIC TREATMENT OF CYLINDERS OF A MODULATOR OF HIGH-ENERGY ACOUSTIC RADIATION

В статье рассмотрены технологические аспекты и результаты применения плазменно-электролитической обработки для создания адаптивных композиционных покрытий на поверхности высокоточных узлов, элементов приборов и датчиков в условиях высокочастотных колебательных нагрузок между соприкасающимися поверхностями.

The article discusses the technological aspects and results of the application of plasma-electrolytic treatment for the creation of adaptive composite coatings on the surface of high-precision components, elements of devices and sensors in conditions of high-frequency oscillatory loads between touching surfaces.

Ключевые слова: плазменно-электролитическая обработка, плазменно-электролитный синтез, микродуговое окисление, адаптивные материалы и покрытия, антифрикционные слои, износостойкость.

Keywords: plasma-electrolytic treatment, plasma-electrolyte synthesis, microarc oxidation, adaptive materials and coatings, antifricion coatings, antifricion layers, wear resistance.

Наиболее эффективные инженерные решения и передовые технологии всё чаще обеспечиваются научными открытиями и опытными разработками адаптивных материалов, в частности, способных изменять свойства и условия трения, ингибируя механизмы электрофизических и электрохимических процессов износа, и согласующих в себе свойства и взаимодействие полимеров, металлов и оксидной керамики в высокоточных сопряжениях.

В настоящей работе на примере цилиндров модулятора высокоэнергетического акустического излучения, изготовленных из полимер-

металлооксидного композита, полученного на основе технологии плазменно-электролитной обработки, рассмотрены технологические аспекты создания и результаты исследования и испытания полимер-металлооксидных композитов, обеспечивающих адаптивные условия трения и защиту от схватывания и заедания.

Типовое устройство модулятора высокоэнергетического акустического излучения представлено на рис. 1. Сжатый газ через фильтр поступает в форкамеру, откуда через клапанный узел выходит в горловину стыковки с рупором [1].

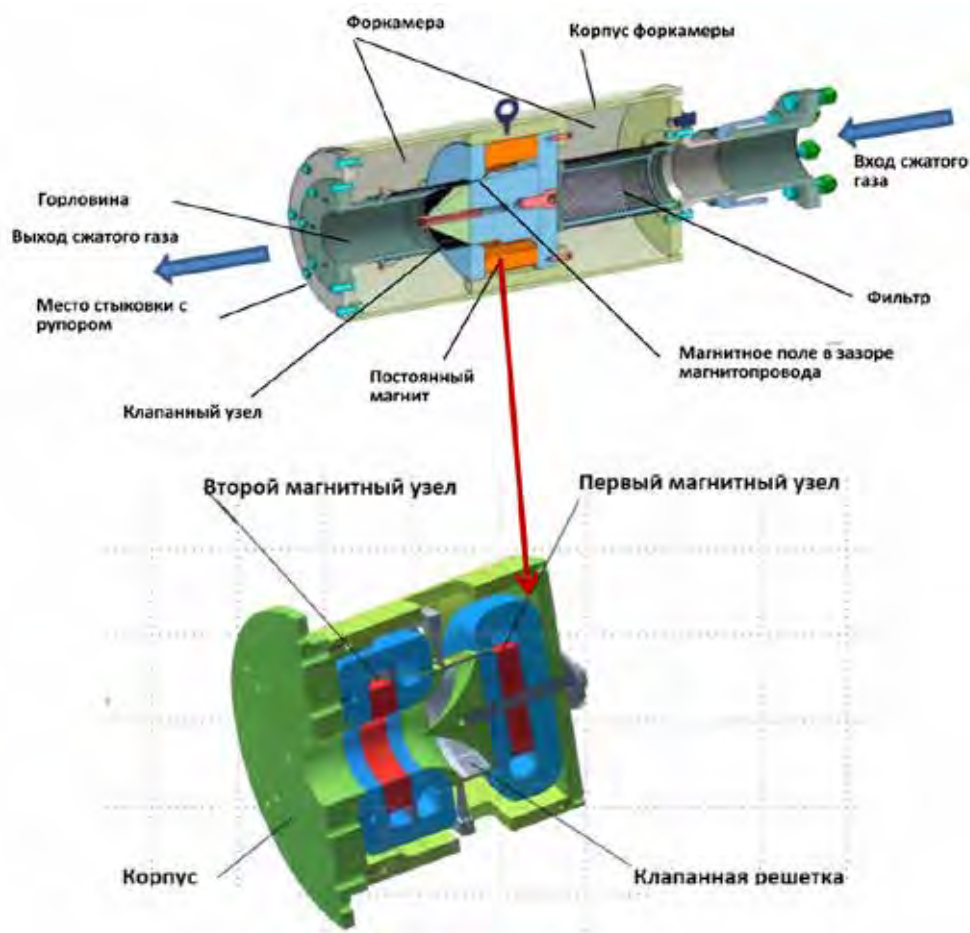


Рис. 1. Типовое устройство модулятора высокоэнергетического акустического излучения

Функцию клапана, модулирующего поток газа, выполняют цилиндры (рис. 2), которые при обюдном перемещении посредством электромагнитного двигателя, дросселируют газовый поток через перекрывающиеся решётки, расположенные на образующей части. Путём достижения определенной степени перекрытия (амплитуды, частоты, скважности импульса), вырабатывается случайный акустический сигнал заданной спектральной плотности. Соответственно, достижение наивысших показателей качества (добротности, акустического КПД и ресурса модулятора в целом), в части механической конструкции при всех прочих равных условиях, зависит в основном от минимизации перетекания газа вдоль оси цилиндров (или точности скользящей посадки) между цилиндрами и снижения потерь на возбуждение колебаний (или потерь на преодоление сил трения).

Опыт применения подобных конструкций клапанов обозначил проблемы, связанные с конструкцией и материалами, из которых изготовлены цилиндры. Наилучшим сочетанием комплекса характеристик

(тепловое расширение, минимальная плотность материала, минимальное усилие трения, жёсткость, износостойкость, ресурс непрерывной работы, технологичность изготовления, обеспечение требуемой точности, предельные эксплуатационные отклонения размеров и параметров качества) относительно применяемых керамических, стальных и алюминиевых с напылёнными, осаждёнными и диффузионными покрытиями, обладают цилиндры из сплавов алюминия с анодными оксидными плёнками, полученные твёрдым анодированием. Прочие материалы пока не нашли применения ввиду специфики необходимой конструкционной массивности, потребляющей высокие энергетические мощности и имеющей паразитную инерционность возбуждения модулятора, а также из-за высоких давлений и температур [2].

Основной проблемой применения цилиндров из алюминиевых сплавов является релаксация формы, прогрессирующий рост сил трения и износа поверхностей с ростом частоты перемещения и температуры. Это обуславливает низкий ресурс и непрерывную

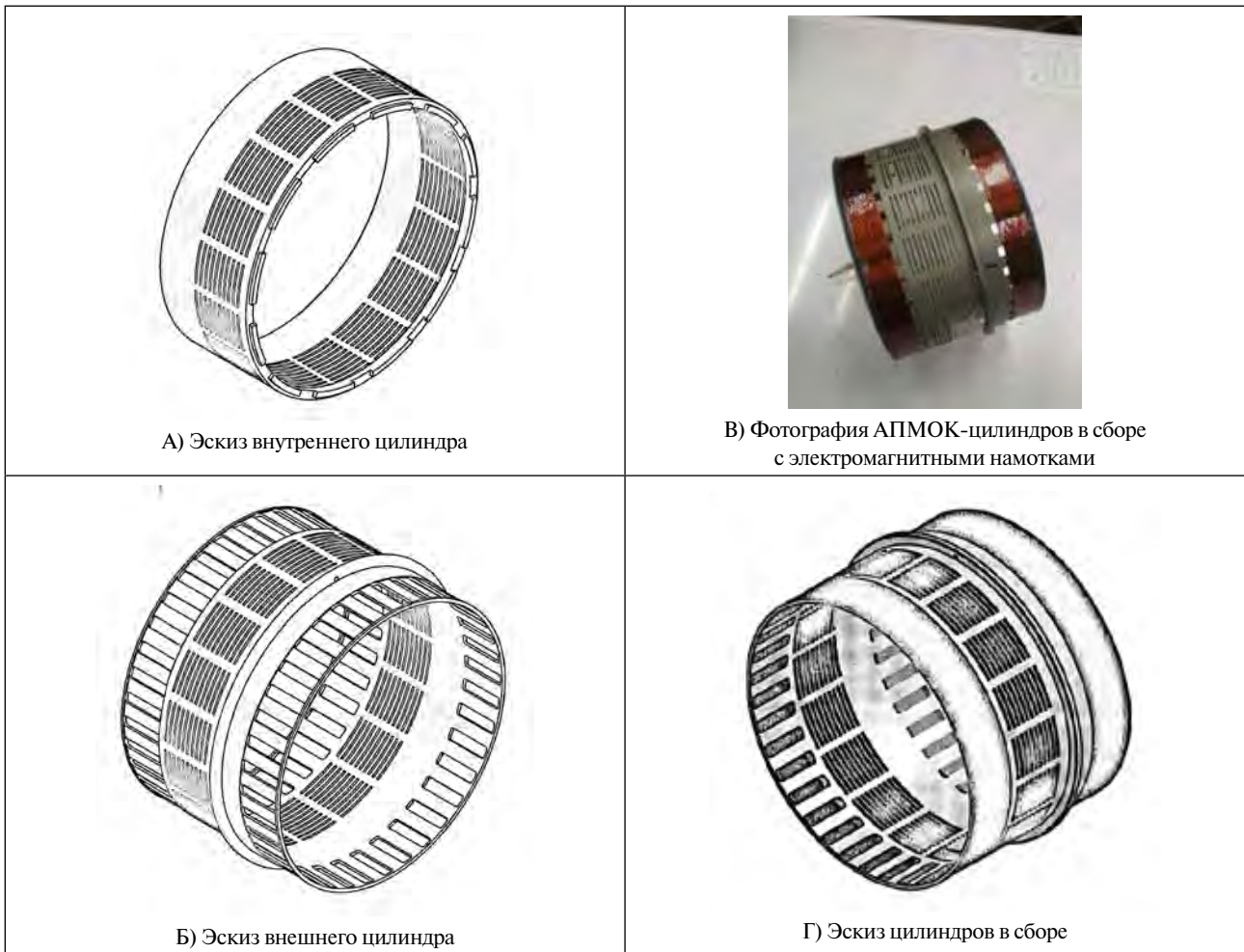


Рис. 2. Цилиндры клапанного узла модулятора высокоэнергетического акустического излучения

продолжительность работы, динамическое сужение диапазона и уменьшение максимума достигаемых частот модулятора. Кроме этого, циклический режим работы приводит к усталостным дефектам и локальным разрушениям в виде задигов (залысин) и отслоения покрытий из-за возникновения и высвобождения касательных напряжений и накопления остаточных напряжений. Применение анодных оксидных покрытий, антифрикционных вставок и смазок несколько (до 7 %) повышают ресурс, но приводят к загрязнениям волновых трактов и не решают проблему низкой непрерывной продолжительности работы и заклинивания клапана [3].

В качестве альтернативного решения предложен адаптивный полимер-металлооксидный композит (ПМОК), изготовленный на основе плазменно-электролитной обработки (ПЭО), обеспечивающей плазменный электрохимический синтез материалов, составные и структурные особенности которых сформированы из компонентов обрабатываемого материала и электролита. Это позволяет модифицировать

объем металлической поверхности, т. е. создавать новую физическую поверхность путём синтеза полимеров, металлов и их оксидов в электрическом плазменном разряде, придавая ей несвойственный иным вариантам комплекс уникальных свойств.

Конструкционной основой адаптивных ПМОК выбран сплав алюминия (Al–Cu–Mg–Li), а адаптивные функции стойкости к изменяющимся условиям в процессе работы клапана (повышению износа и сил трения) обеспечиваются вновь синтезируемой в электролитной плазме полимер-металлооксидной поверхностью, обладающей адаптивными антифрикционными свойствами:

– ингибирующими процессы износа и трения разнородными модификациями высокотемпературных оксидов, преимущественно комплексов алюминия α -Al₂O₃ (29–38 %) и кремния SiO₂ (до 15 %) с высшими аллотропными модификациями шпинелей, образованных из основных веществ источников плазмы, типа Al₂SiO₅ (27–34 %), Al₂CuO₄ (3–9 %) и включениями, увеличивающими поверхность

плотность распределения измельчаемых в процессе центров узлового плазмы, шпинелей $Mg(AlO_2)_2$ и $LiAlO_2$ суммарно до 3 %, и интерметаллидов Al_2Cu и Al_3Li , в непредсказуемо малых концентрациях (до 2 %), обеспечивающих стационарное электрическое сопротивление и теплопроводность в интервале эксплуатационных температур;

– снижающим силы трения и процессы износа антифрикционным агентом (сополимером тетрафторэтилена с этиленом), выходящим под действием сил теплового расширения из активированной мезопористой структуры матрицы на уровне нескольких мономолекулярных слоёв в плоскости приработанных (самопритёртых) зерен и кристаллов поверхности скольжения.

В ходе обработки технологического процесса изготовления адаптивных ПМОК установлены диапазоны допустимых отклонений конструктивных размеров цилиндров (в пределах поля допуска 3...7 мкм), разработана технология изготовления ПМОК-цилиндров, состоящих из алюминиевой конструкционной основы с модифицированной поверхностью (металлооксидной матрицей), наполненной этиленовым сополимером тетрафторэтилена, исследованы структура и элементно-фазовый состав, а также изготовлен испытательный стенд-демонстратор (макет-образец модулятора) с ПМОК-цилиндрами.

На рис. 3 представлены фотографии ПМОК, полученные на растровом электроном микроскопе FEI Quanta 600 FEG при различном увеличении.

На рис. 4 приведена схематическая модель распределения фазового состава и микротвёрдости на поперечных косых шлифах поверхности слоёв ПМОК, построенная на основе результатов: послойного фазового анализа при помощи рентгеновского дифрактометра ARL9900 Intellipower Workstation и измерения микротвёрдости методом Виккерса при нагрузке 1,0 Н на микротвердомере DM-8 Affri.

На рис. 5 приведен спектр и валовый химический состав полученный на площади косого (25°) поперечного шлифа поверхности, травленого ионным пучком при помощи блока EDAX растрового электронного микроскопа Quanta 600 FEG.

На рис. 6 показаны электрическая схема привода модулятора и фотография сборки демонстратора.

Диапазоны допустимых отклонений конструктивных размеров цилиндров определены с учётом обоюдных деформаций, устанавливающих зазор (до 14 мкм) между цилиндрами под действием предельных температур, пульсаций давления и потока газа, возникающих в процессе работы. Это послужило исходными данными при назначении допусков и припусков на механическую обработку металлической основы цилиндров и технологических параметров плазменно-электролитической обработки, обеспечивающих условия синтеза.

Технологический процесс получения адаптивного ПМОК произведен на лабораторно-промышленной установке Центра плазменно-электролитных технологий ЦНМиТ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». Типовая схема установки представлена на рис. 7.

В основном оборудовании для электрохимической обработки (рис. 7) состоит из электролитной ванны или нескольких ванн (1), технологического источника тока, систем охлаждения и перемешивания (3, 12) электролита и вытяжной вентиляции (13, 14). Система охлаждения электролита может состоять из устройств для прокачки (5, 7, 8, 10) электролита и/или охлаждения (2, 6, 9) рубашки ванны. В баке 10 системы прокачки электролита находится теплообменник для охлаждения этого электролита. Перемешивание электролита реализуется либо продувом воздуха через электролит – путем барботажа (рис. 1, поз. 3, 12), либо механическим перемешиванием при помощи мешалки – двигателя с укрепленной на валу крыльчаткой (на рис. 7 не показана).

К основным установленным технологическим параметрам процесса получения ПМОК на разных стадиях можно отнести:

– электрический режим инициирования плазменных разрядов – комбинированный симметричный импульсный анодно-катодный с завершением на спаде анодного полупериода и последовательный анодный импульсный;

– суммарная продолжительность процесса – 150 мин;

– плотность тока – 4...35 А/дм²;

– состав электролита – силикатно-щелочной водный раствор-суспензия алюминатов (до 2,5 %) и этиленового сополимера тетрафторэтилена (0,5–5 % в зависимости от стадии) с поверхностно-активными веществами (до 0,1 %);

– температура электролита – 20...60°C.

Комплекс указанных технологических устройств и вариативных параметров обеспечивает протекание нескольких основных стадий-процессов:

– предварительная (первичная) заместительная активация поверхности, посредством которой решаются проблемы создания условий плазменно-электролитического преобразования кристаллической решётки зёрен модифицируемого металла в субмикродисперсную аморфно-кристаллическую структуру пористого металлооксидного слоя (материала электрода), являющегося узловым источником веществ (в частности, донором катионов металлов в синтезе), образующих оксидные слои композита;

– синтез функционального полимер-металлооксидного композита в объёме новой физической поверхности (матрицы), на основе активированного металлооксида и синтезирующихся кристаллогидратов из образующегося субстрата заряженных растворенных, коллоидных и взвешенных веществ – агрегатов электролита, контракционных линиями напряженности электромагнитного поля, и

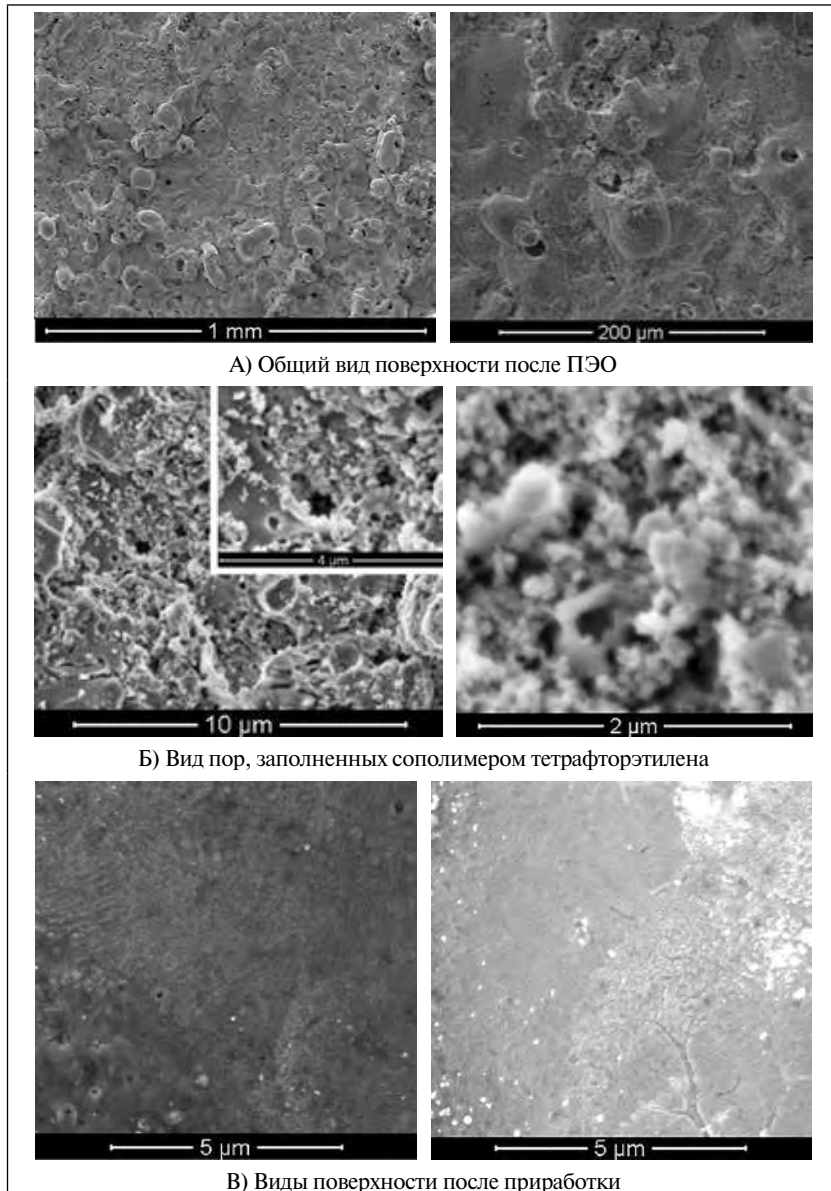


Рис. 3. РЭМ-фотографии поверхности цилиндров

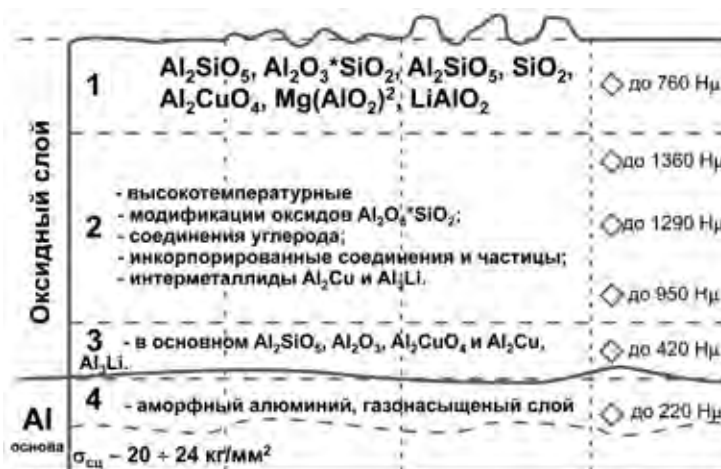


Рис.4. Схематическая модель распределения фазового состава и микротвёрдости слоёв ПМОК. Обозначены условные слои: 1 – внешний притираемый слой; 2 – основной рабочий слой; 3 – переходный слой; 4 – материал-основа

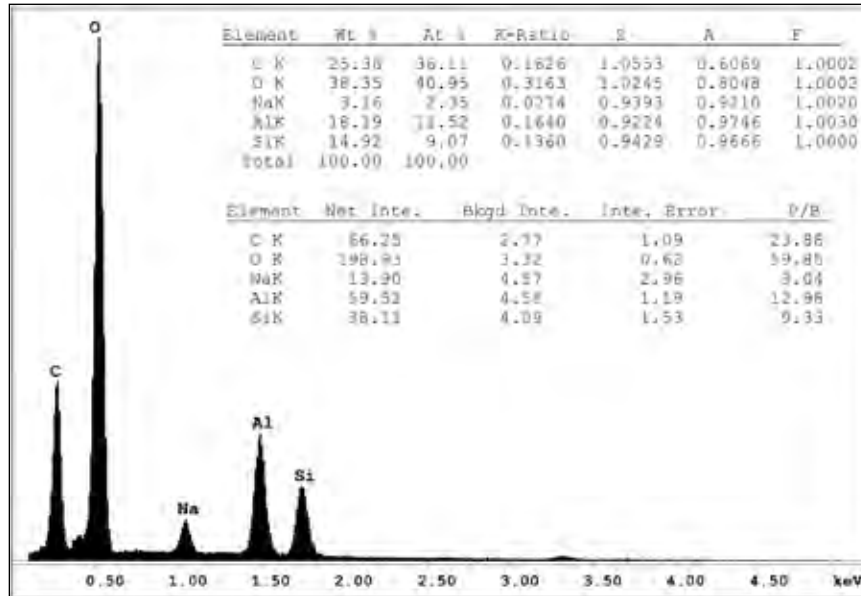


Рис. 5. Рентгеноспектральный анализ площади косого (25°) поперечного шлифа поверхности ПМОК

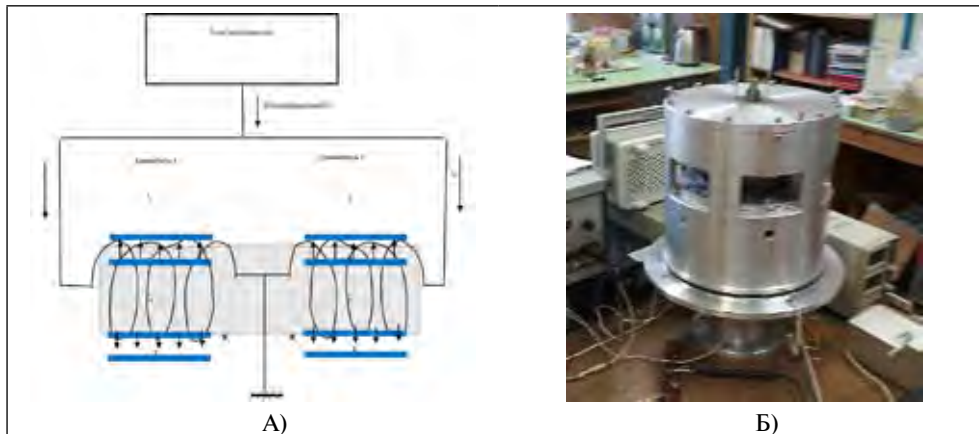


Рис. 6. Электрическая схема привода модулятора (А) и фотография сборки (Б) демонстратора

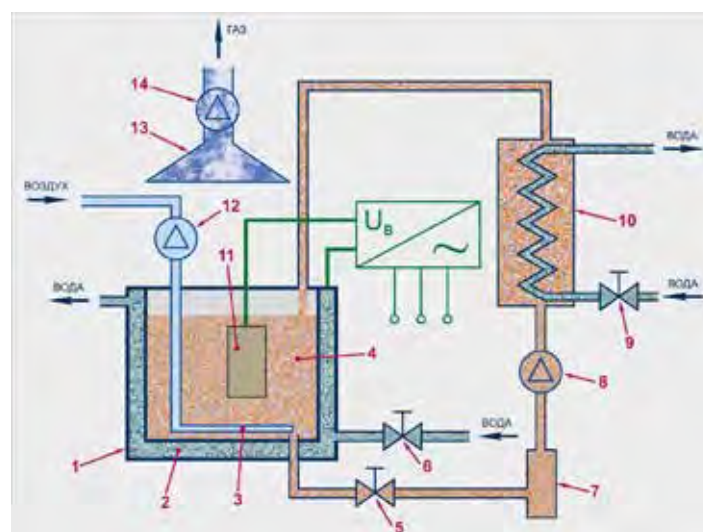


Рис. 7. Состав установки ПЭО: 1 – электролитная ванна; 2 – рубашка водяного охлаждения; 3 – барботер; 4 – электролит; 5, 6, 9 – запорная арматура; 7 – фильтр; 8 – водяной насос; 10 – бак с теплообменником; 11 – деталь; 12 – воздушный компрессор; 13 – вытяжной зонт; 14 – вытяжной вентилятор

инкорпорируемых нейтральных диффузно-распределенных сополимеров в электролите;

– окончательная плазменно-электролитическая активация и электрофоретическое наполнение мезопор матрицы металлооксидного композита агрегированными поверхностно-активными веществами в электрическом поле и соединениями с этиленовым сополимером тетрафторэтилена, обеспечивающим адаптивную функцию снижения сил трения при росте температуры.

Стадии синтеза и структура антифрикционного слоя могут быть также рассмотрены в рамках общей аналогии модельных представлений [4, 5].

Из них можно сделать следующие выводы.

1) Формирование внешнего слоя ПЭ-покрытий протекает в основном вследствие выноса на поверхность покрытий расплава оксида алюминия с воздействием на него большого количества парогазовой фазы после угасания микроразрядов в сквозных поперечных порах покрытий.

2) Формирование внутренних слоев ПЭ-покрытий протекает по двум механизмам. Первый – образование расплава оксида алюминия и его вынос не на поверхность покрытия, а заполнение им ряда пор во внутренних слоях и прилегающей к ним части объема внешних слоев покрытий после функционирования анодных плазменных микрозарядов под внешними слоями покрытий. Последнее реализуется вследствие зажигания микропробоев в анодный «полупериод», когда анодное напряжение не достигает максимальных значений. Второй – по механизму конвективного диффузионного переноса ионов алюминия и кислорода через расплавленные локальные участки внутренних слоев покрытий, прилегающих к высокоэнергетическим плазменным микрозарядам. Последние реализуются в поперечных сквозных порах покрытий в наибольшей степени при амплитудных напряжениях. Второй механизм роста внутренних слоев ПЭ-покрытий преобладает после значительного уменьшения пор во внутренних слоях.

3) Причиной отсутствия изменения или незначительного изменения размеров образцов при интенсивном росте толщины покрытий приблизительно от 50–80 мкм является расход алюминия не только на рост ПЭ-покрытий, но и на заполнение пустот, поперечных пор, особенно в их внутренних слоях.

4) Значительное изменение заданной плотности тока при протекании плазменно-электролитической обработки (ПЭО) сплава Д16 по механизмам окисления металлической основы приводит только к возрастанию скорости роста покрытий, но не к изменению интервалов толщин покрытий, при которых изменяются механизмы их формирования. Показано, что для получения износостойкого антикоррозийного внутреннего слоя покрытий процессы ПЭО при всех заданных плотностях тока ($15 - 45 \text{ А/дм}^2$) следует проводить до толщины не менее 80 мкм.

В табл. 1 представлены достигаемые физико-химические характеристики полученных ПМОК, в том числе по части данных приведенных в источниках [4, 6–8].

Механизм работы и эффективность, предварительно исследованные на образцах, в целом характеризуются тем, что при первичном выходе на задаваемые частоты (от 70 до 1500 Гц) происходит приработка поверхности (до 31500–42000 циклов возвратно-поступательных движений) с выходом отходов (до 12 % от синтезированной массы). После этого, по мере притирания поверхности (до 200000–600000 циклов движений в диапазоне частот от 300 до 1500 Гц), выход продуктов износа уменьшается (до менее 0,01 % от синтезированной массы). Одновременно с этим, снижаются радиальные напряжения и контактные нагрузки в большей степени вследствие их распределения по увеличивающейся площади контактной поверхности. Так происходит вплоть до значений, соответствующих удельному усилию сдвига полимерно-оксидных связей (менее 0,01 кг/мм²), обеспечиваемых устанавливающимися размерами мономолекулярных слоёв тетрафторэтилена, вытягивающегося с ростом температуры из мезопористой структуры композита под действием сил поверхностного натяжения сополимера, проявляющихся в электретных и механико-химических эффектах [9, 10].

Значения нормальных нагрузок на трущиеся поверхности определяются напряжениями (внешним давлением газа) и усилиями, вызванными деформацией цилиндров от наследственных напряжений и высвобождаемых в процессе работы. Значения нормальных нагрузок определены по диапазону усилий перемещения и площади износа контактных площадок (в диапазоне 21,8 до 31,6 см²), которую удалось установить в диапазонах 0,15–0,35 МПа с учётом изменяемого давления газа P от 0,028 до 0,07 кг/м² и перепада среднедействующей величины давления пульсаций.

На графике (рис. 8) показаны зависимости адаптации функций характеристик напряжений трения и температуры от продолжительности (количества циклов движений при частоте 1250 Гц), справедливые и в продолжение наработки. Коэффициент трения при увеличении нагрузки с шагом в 1,5 раза вырастает в пределах 20 % от исходного значения и вплоть до наработки свыше 150 млн. циклов стремится к значениям в диапазоне от 0,009–0,011. Дальнейшая наработка (свыше 175 млн. циклов при частотах 800 – 1500 Гц) по не установленным причинам не сопровождается существенным износом и изменениями нагрузок.

Дополнительно стоит отметить следующее.

– При сравнительной оценке характеристик цилиндров с ПМОК-покрытиями и фторопластовыми склизками усилия трения последних превышали ПМОК более чем в 2,5 раза.

– Критическая величина превышения давления (свыше 1,5 кг/мм²) приводит к увеличению сил

Таблица 1. Полученные физико-химические характеристики ПМОК

№	Наименование	Характеристики
1	Фазовый состав	
	компоненты матрицы:	– $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – от 30 до 60 % – SiO_2 – от 20 до 50 % – Al_2SiO_5 от 5 до 70 %
	компоненты связей и привнесённых элементов и соединений:	– интерметаллиды – до 4 % – оксиды примесей – до 5 % – коллоиды
2	Плотность, г/см ³	3,2 – 4,1 (регулируемая, с учетом пористости)
3	Рабочий диапазон температур:	– наработка до 10000 часов – от -50°С до +300°С (на воздухе) – наработка до 100 часов – от -50°С до 350°С (на воздухе) – термоудар до 12–15 с/мм ³ – до 2500°С (на воздухе)
4	Температура деструктуризации (фазового перехода наиболее легкоплавкого компонента)	от 250°С до 2000°С.
5	Теплопроводность	– при 300К – от 35 до 40 Вт/м*К – при 700К – от 11 до 15 Вт/м*К
6	Теплоёмкость	55 – 79 Дж/моль*К
7	Толщина	до 250 мкм
8	Микротвёрдость	от 700 до 2500 HV (отдельные случаи 4500)
9	Прочность сцепления	На уровне материала основы, до 35 кг/мм ²
10	Электрическая прочность	– при толщине от 1 до 10 мкм – до 200 В/мкм – при толщине от 70 до 100 мкм – до 30 В/мкм – при толщине от 150 до 200 мкм – до 22 В/мкм
11	Диэлектрическая проницаемость	От 2 до 50
12	Удельное сопротивление при толщинах 50 – 250 мкм	от 0,1 до 18,1 МОМ*м
13	Тангенс угла диэлектрических потерь	от 0,017 до 0,730
14	Сквозная пористость	0,5 до 50 %
15	Коэффициент трения (наилучший результат без эрозии и износа):	– МДО-покрытие/МДО-покрытие – 0,004–0,01 – покрытие/сталь 45 – 0,009 – 0,012 – покрытие/алюминий Д16 – 0,07 – 0,1

трения, превышающих усилия страгивания, развиваемые электромагнитным движителем. При этом в начальное время приработки локальные нагрузки могли достигать 7–10 кг/мм².

Таким образом, в ходе разработки технологии формирования полимер-металлооксидного композита решены задачи:

- создания твёрдого кристаллогидратного и металлооксидного слоя (материала электрода), являющегося узловым источником веществ для синтеза в электролитной плазме, обеспечивающего формирование адаптивных полимер-металлооксидных композиционных слоев (покрытий);

- ингибирования процессов трения, приводящих к износу путем блокирования основных условий их возникновения;

- формирования композита посредством управления параметрами плазменного разряда, формирующего условия синтеза адаптивных антифрикционных поверхностей.

Заключение

В области плазменно-электролитной обработки в настоящее время ведутся весьма обширные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в направлениях:

- преобразования кристаллической решетки зёрен металлов (и их сплавов) в аморфно-кристаллические структуры с участием доноров ионно-ковалентных связей, получаемых плазмой, образуемой между металлом и кристаллогидратом (твёрдым электродом) на границах раздела металл-оксид-электролит при высоких скоростях охлаждения;

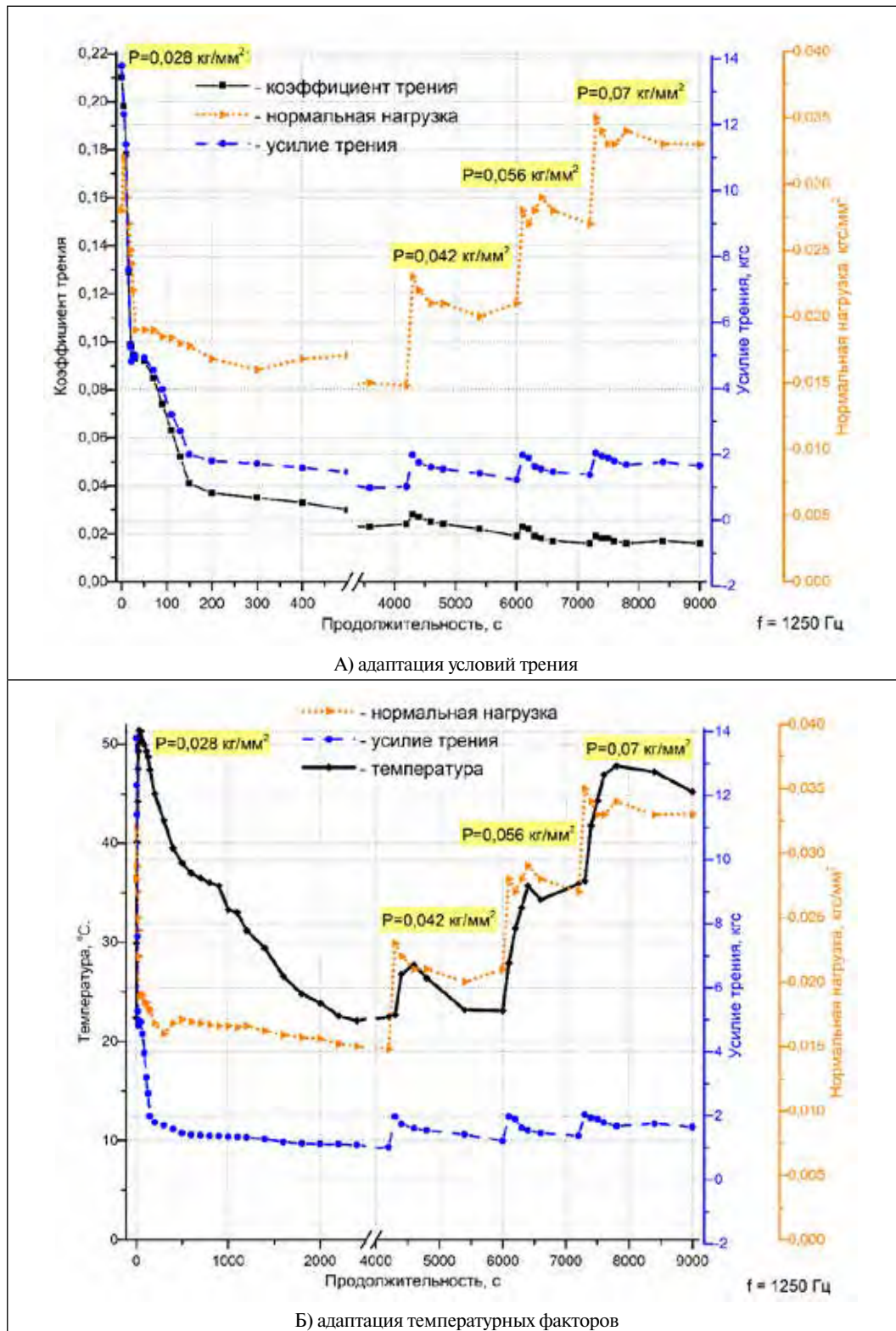


Рис. 8. Коэффициент трения (А), температура (Б) и измеренные осевое усилие перемещения при частоте $f=1250$ Гц и амплитуде колебания $\Delta l=0,9$ мм) и при изменении давления P в процессе испытания

– синтез электретных конструкционных материалов и металлооксидных композитов на функциональных поверхностях;

– плазменно-электролитная модификация органических углеводородных материалов, селективное замещение углеводородных соединений биологических материалов на кремнийорганические (алюмосиликатные, фосфосиликатные и т. п.);

– переходно-коммутационное построение и структурирование термоэлектрических материалов;

– преобразование состава и структуризация поверхности пористых и крупнозернистых металлооксидных материалов, полученных методами аддитивного спекания и сплавления потоками высоких энергий;

– обработка водных растворов (деионизация, разделение, обессоливание и уплотнение).

Наиболее перспективными в рассматриваемой области опытов представляются следующие исследования:

– исследования эффекта и зависимости изменения электрического сопротивления пар трения из металлооксидных слоёв (ПМОК) от плотности потока энергии взаимного перемещения при вариативных механических и тепловых деформациях, что может открыть возможность реализации функций самодиагностики (тензорезистивных измерений) в подобных системах, а также управления частотно-резонансными функциями собственных колебаний подобных клапанных узлов;

– исследования влияния электростатических и электрострикционных эффектов на изменения условий трения полимер-металлооксидных слоёв при приложении электрических полей;

– исследования снижения веса, износа, инерционности и моментов сопротивления механических систем управления с использованием новых образцов низкомоментных сферических опор и подшипников скольжения, на основе полимер-металлооксидных композитов, с целью повышения технико-экономических характеристик приборов и летательных аппаратов.

Коллектив авторов весьма признателен коллегам, разрабатывающим глубины тонкостей электрических и физико-химических эффектов в данном направлении исследований.

Библиографический список

1. Пат. RU2707587C1 Российская Федерация, МПК G10K 7/06 (2006.01). Способ генерации звука для испытаний конструкций и устройство для его реализации / Стерлин А.Я., Фурман А.В., Ким С.К., Куценко С.А.; Опубликовано: 28.11.2019 г. Бюл. № 34. – 15 с.: ил.

2. **Стерлин А.Я.** Принцип построения высокочастотных модуляторов звука для акустических испытаний

на прочность и ресурс летательных аппаратов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020; 86 (11): С. 60–66.

3. **Жуков С.В., Стерлин А.Я., Суминов И.В.** Технология преобразования атомарно-кристаллической решетки зёрен металлических сплавов в аморфно-кристаллические структуры металлооксидов (с участием доноров ионно-ковалентных связей растворов), образуемых между металлом и кристаллогидратом (твёрдым электродом) на границах раздела металл-оксид-электролит в электролитной плазме. Материалы докладов «V-Национального конкурса инновационных проектов аэрокосмической отрасли». «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», ВУЗПРОМЭКСПО, 10–11 декабря 2020 г. М.: ВУЗПРОМЭКСПО, 2020. – 9 с.

4. **Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х томах. Том II. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.

5. **Rakoch A.G., Khabibullina Z.V., Volkova O.V., Borko A.V., Tran Van Tuan, Suminov I.V. and Zhukov S.V.** Influence of current density and duration of PET of AA2024 alloy on the rate and growth mechanisms of a wear-resistant anticorrosive coating inner layer. Int. J. Corros. Scale Inhib., 2021, 10, no. 4, P. 1621–1637.

6. **Жуков С.В., Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Желтухин Р.В.** Исследование влияния МДО-обработки на механические характеристики алюминиевых сплавов при испытаниях на растяжение. Печ. Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 5-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. 12–13 декабря 2006 г. «МАТИ» – РГТУ им. К.Э. Циолковского.: Сб. трудов.. М.: МАТИ, 2006. – 5 с.

7. **Жуков С.В., Кантаева О.А., Желтухин Р.В., Эпельфельд А.В., Бер Л.Б.** Исследование физико-механических свойств, структуры и фазового состава покрытий, полученных методом микродугового оксидирования. Приборы. № 4, 2008. С. 28–32.

8. **Жуков С.В., Суминов И.В., Желтухин Р.В., Фомичев А.А., Эпельфельд А.В., Эпельфельд И.В.** Исследование износостойкости МДО-покрытий на алюминии. Научные труды МАТИ. Вып. 14 (86). – М.: ИЦ МАТИ, 2009. С. 206–212.

9. **Рыжков А.А., Бурлакова В.Э.** Об электрических явлениях при трении. Технические науки. Вестник ДГТУ. 2011. Т.11, №9(60), С. 1564-1573.

10. **Лукашев Е.А., Сидоров М.И., Юрцев Е.С.** Некоторые аспекты электрохимического представления о процессах изнашивания в трибологии. Современные материалы, техника и технологии, № 2 (10), 2017. С. 90–98.

Жуков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц., зав. лабораторией ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
ser.zh82@mail.ru

Стерлин Андрей Яковлевич – д-р техн. наук, главный научный сотрудник ГИЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»
andrey.sterlin@tsagi.ru

Суминов Игорь Вячеславович – д-р техн. наук, профессор, директор центра новых материалов и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
ist3@mail.ru

Zhukov Sergey Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor, head of the laboratory of MSUT «STANKIN»
ser.zh82@mail.ru

Sterlin Andrey Yakovlevich – D.Sc. of Engineering, chief research officer SSC FSUE «Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N. E. Zhukovsky»
andrey.sterlin@tsagi.ru

Suminov Igor Vyacheslavovich – D.Sc. of Engineering, full professor, director of the center for new materials and technologies of MSUT «STANKIN»
ist3@mail.ru

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.777

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова
A.M. Dmitriev, N.V. Korobova

КОНСТРУИРОВАНИЕ ШТАМПОВ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОРОШКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

DESIGN OF DIES FOR FORMING HIGH DENSITY HOLLOW AXISYMMETRIC POWDER PARTS

Представлены два варианта конструкции штампа для формования порошковых заготовок, созданные на основании двух противоположных концепций уплотнения порошка: не допускающей сдвигов в формуемой заготовке и создающей интенсивные сдвиги в заготовке. Продемонстрированы преимущества второй концепции, разрабатываемой авторами.

Two variants of the die design for forming powder blanks are presented, created on the basis of two opposite concepts of powder compaction: not allowing shifts in the pressing billet and creating intense shifts in the billet. The advantages of the second concept developing by the authors are demonstrated.

Ключевые слова: Заготовки порошковые, формование холодное, сопоставление конструкций штампов.

Keywords: powder billets, cold forming, comparison of stamp designs.

Авторы данной статьи, являясь сотрудниками МГТУ «СТАНКИН», успешно сотрудничают с журналом, публикующим результаты исследований, проводимых в этом вузе [2–4]. Данная статья продолжает тематику, рассматриваемую в указанных выше публикациях.

Конструкции штампов для производства деталей из порошков на железной основе холодным формованием порошковой шихты перед последующим ее спеканием сложнее, чем штампов для холодной объемной штамповки деталей аналогичной формы из заготовок, отрезанных от прокатанных прутков.

Выпускаемые порошковые пресс-автоматы имеют небольшие величины ходов деформирующих порошок инструментов и высоты засыпных камер в матрицах [3–5]. Автоматами они названы потому, что снабжены бункерными и подающими устройствами для засыпки порошка в штампы.

Пример штампа [1] для формования заготовки стакана к пресс-автомату показан на рис. 1. Приведенная на этом рисунке пресс-форма сконструирована на основе концепции о том, что во всех элементах изготавливаемой детали порошок должен быть уплотнен с одинаковыми изменениями между его исходной

(засыпной) плотностью и плотностью этого элемента после уплотнения порошка.

Штамп состоит из пуансона 1, матрицы 2, трубчатого пуансона 3 и оправки 4. После заполнения порошком полости матрицы, ограниченной оправкой и трубчатым пуансоном, пуансон 1 опускается, уплотняя порошок, одновременно опускаются матрица 2 и оправка 4, обеспечивая схему двухстороннего формования и получение равноплотной сформованной заготовки. Оправка 4 опускается до тех пор, пока шток гидроцилиндра привода оправки не достигнет регулируемого упора, смонтированного в прессе. После этого дно и стенки формуемой детали дополнительно уплотняются при неподвижной оправке (рис. 1).

Для расчета размерных цепей рабочих элементов штампа используют параметры: $H_{\text{п}}$ – ход ползуна пресса, $H_{\text{в}}$ – ход выталкивателя пресса, H_1 – расстояние от нижнего торца верхней плиты штампа до верхнего торца (зеркала) матрицы, H_2 – максимальное расстояние от зеркала матрицы до нижней плоскости плиты опоры трубчатого пуансона, H_3 – максимальное расстояние от торца штока цилиндра перемещения оправки до нижней плоскости плиты опоры трубчатого пуансона, H_4 – толщина прокладки, H_5 –

толщина набора из плиты опоры трубчатого пуансона и прокладки, $h_{н1}$ – насыпная высота порошка для формирования стенки детали, $h_{н2}$ – насыпная высота порошка для формирования донной части детали, h – высота детали, h_1 – толщина дна детали.

Длину H_6 пуансона 1 и длину H_7 трубчатого пуансона 3 определяют из следующего соотношения:

$$H_1 + h_{н1} = H_{п1} + H_4 + H_6 + h,$$

откуда

$$H_6 = H_1 + h_{н1} - (H_{п1} + H_4 + h), H_7 = H_2 - (H_{п2} + H_5).$$

В рассматриваемом штампе оправка 4 опускается до упора на величину хода, определяемую по соотношению

$$S = (h_{н1} - h_{н2}) - (h - h_1).$$

Длину оправки рассчитывают по формуле

$$H_8 = (H_2 + H_3) - (H_{п2} - H_1) - S.$$

Используя приведенные данные, составляют методику расчета, позволяющую избежать ошибок при проектировании элементов штампа и сокращающую этап технологической подготовки производства.

На рис. 1 видно, что приведенная конструкция штампа предназначена для формирования невысоких деталей типа стакана с совсем неглубокой полостью. Если из размерного ряда выбирать пресс-автомат, то, руководствуясь требованиями к величинам рабочих ходов его исполнительных элементов и размерам засыпных камер пресс-форм, придется выбрать пресс-автомат с весьма большим запасом по создаваемой им силе по сравнению с силой, необходимой для формирования порошковой заготовки детали. Эксплуатация такого пресса будет происходить при низком КПД.

Авторы данной статьи придерживаются противоположной [4, 6–18] указанной выше концепции, считая, что при создании интенсивных сдвигов в уплотняемой шихте предотвращается появление расслоений в формируемой заготовке, вызываемых высокими давлениями на уплотняемую порошковую шихту, и открывается возможность формирования высокоплотной порошковой детали на этапе, предшествующем ее спеканию.

При уплотнении с созданием интенсивных сдвигов в уплотняемой шихте на заготовку, помимо нормальных напряжений сжатия, действуют касательные напряжения τ_k (рис. 2). Напряжения τ_k вызваны силами трения на поверхностях контакта элементов штампа с формируемым порошком. Под действием τ_k в материале заготовки возникают сдвиги между частицами порошка [11, 12], что приводит к закрытию пор и предотвращению так называемых перепрессовочных трещин. Порошок как бы «затягивается» силами трения в тонкую часть стенки и «перемешивается».

Несмотря на различие указанных выше концепций, формирование порошковой детали из шихты при создании интенсивных сдвигов так же, как и формирование в приведенном на рис. 1 штампе, требует ряда последовательно выполняемых перемещений элементов штампа в процессе одной формирующей

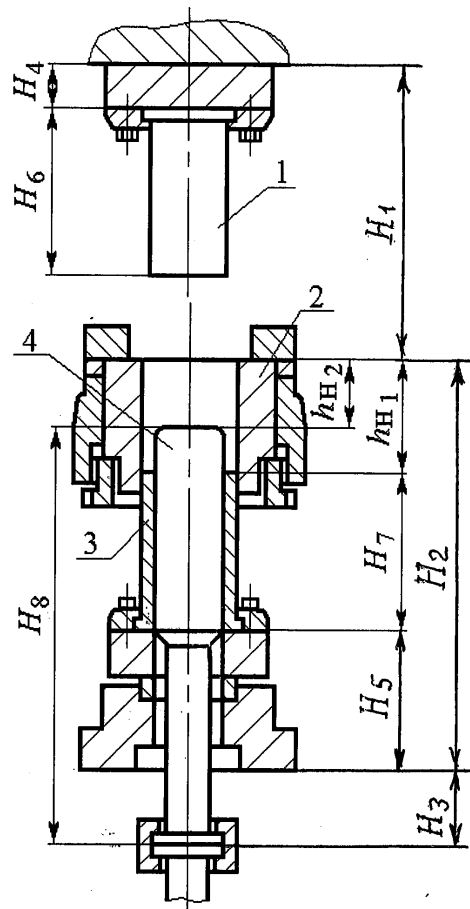


Рис. 1. Пресс-форма (штамп) для формирования заготовки стакана

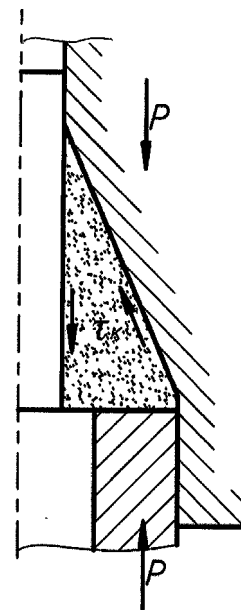


Рис. 2. Схема действия касательных напряжений τ_k при формировании порошковой шихты

заготовку операции. На рис. 3 показан лабораторный штамп, предназначенный для изготовления детали формованием со сдвигами слоев порошка. Слева от оси штамп изображен перед началом приложения уплотняющей и деформирующей порошок шихту силы, справа – в конце уплотнения.

Штамп состоит из бандажированной матрицы, содержащей бандаж 4 и вставку 3 (см. рис. 3), внутреннего пуансона 1, наружного пуансона 2, втулки 5, иглы 6. Матрица крепится к ползуну пресса, как показано выше, на рис. 4.2. Предлагаемая конструкция инструмента благоприятна для засыпки порошка через верхнее очко матрицы, поскольку порошок засыпается в расширяющуюся полость.

После засыпки порошка верхнее отверстие полости матрицы закрывается втулкой 6, и начинается уплотнение порошка, процесс которого можно разделить на приведенные ниже 3 этапа.

На I этапе производится предварительное уплотнение верхней части конуса детали и оформление ее верхней торцевой поверхности путем продвижения втулки 5 в верхнее отверстие матрицы. На II этапе формируется цилиндрическая часть детали двухсторонним воздействием давления. При этом внутренний пуансон 1 перемещается относительно наружного пуансона 2. На III этапе порошок уплотняется двухсторонним осевым давлением при одновременном радиальном выдавливании благодаря совместному перемещению пуансонов 1 и 2 относительно конической части матрицы.

При формировании детали необходимо достичь максимально высокую среднюю плотность в средней ее части, а также обеспечить относительно высокую плотность в ее цилиндрической части.

Для решения этих задач было подобрано начальное (перед засыпкой порошка) взаимное расположение матрицы и наружного пуансона H , а также – наружного и внутреннего пуансонов: h .

Наружный пуансон относительно внутреннего выставлялся с помощью подкладных колец и мерных плит. Аналогично выставляется размер H .

Формование проводилось из порошковой шихты на основе порошка марки ПЖРВ3.200.28, легированного 0,65 % углерода. При подготовке порошковой шихты в нее в качестве смазки добавили 1 % стеарата цинка. В качестве технологического оборудования использовали универсальный пресс ПБ-476, имевший номинальную силу 1,6 МН.

Объем засыпаемого порошка соответствовал теоретическому объему, рассчитанному по чертежу детали. При чрезмерном увеличении размера h наблюдалось недостаточное уплотнение цилиндрической части и, как следствие, разрушение детали в месте перехода от конической части к цилиндрической при извлечении ее из штампа. При малом h также имело место недостаточное уплотнение цилиндрической части, которое вело к разрушению детали.

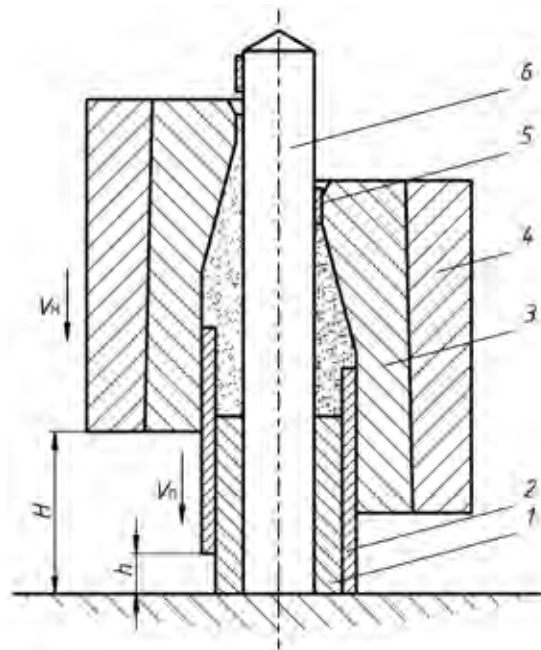


Рис. 3. Схема и перемещения элементов лабораторного штампа для формирования детали со сдвигами слоев порошка



Рис. 4. Порошковые втулки со ступенчатой фланцевой частью из ПЖРВ3.160.24

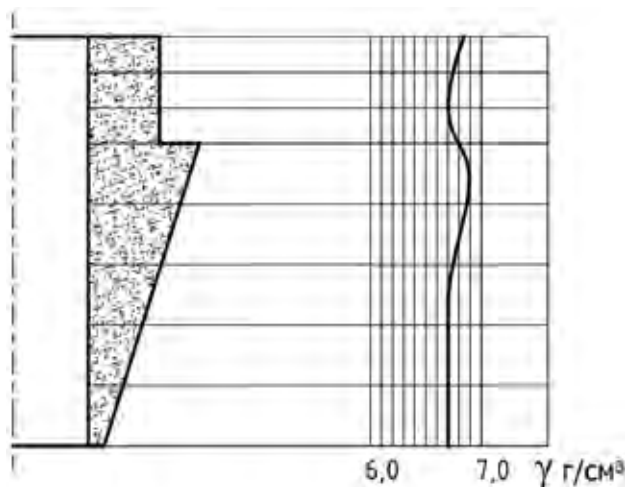


Рис. 5. Распределение плотности во втулках со ступенчатой фланцевой частью

Процесс уплотнения порошка обладает элементами саморегулирования. Формование цилиндрической и конической частей детали происходит одновременно. Средняя плотность изготовленных деталей составляет 87 % от теоретической плотности железа. Формованные детали обладают высокой стабильностью свойств. После выбора наилучших размеров h и H все изготовленные в опытной партии детали удовлетворяли заданным требованиям (рис. 4). Распределение плотности в заготовках приведено на рис. 5.

В наиболее тонкой части втулки находятся высокие плотность и прочность. В этом состоит преимущество разработанного способа перед обычными способами формования, в которых порошок в тонкой части втулки остается неуплотненным. Недостаток, имеющий место при обычных способах и заключающийся в образовании расслоений при относительной плотности 80 ... 85 % (по отношению к теоретической плотности железа), здесь устранен созданием сдвигов слоев в заготовке.

Для осуществления съема формованной детали на наружном пуансоне сделана резьба для навинчивания фланца, являющегося опорной поверхностью при извлечении детали из матрицы.

При формовании детали по схемам, в которых используются активные сдвиги между частицами уплотняемой порошковой шихты, на стадии, предшествующей спеканию формованной заготовки, достигаются такие плотности изделия, при которых возможно проведение анализа структуры и свойств заготовки, как это показано в работах [4, 6, 9, 12, 17].

При спекании, следующим за формованием порошковых заготовок, в большинстве случаев наблюдается увеличение плотности и уменьшение объема спекаемых порошковых тел [19]. В зависимости от скорости протекания усадки весь процесс уплотнения порошковых тел можно условно разделить на три стадии. На первой, начальной стадии спекания, скорость усадки наиболее высокая. Происходит быстрое сокращение объема пор. Кинетика уплотнения в основном определяется явлениями, происходящими в приконтактных областях между частицами, и зависит от их структурного состояния и формы.

На второй стадии скорость усадки замедляется. Уплотнение порошкового тела идет во всем его объеме. Тело ведет себя как вязкая среда с соответствующим коэффициентом вязкости. На третьей стадии спекания усадка и повышение плотности порошковых тел незначительны. В структуре имеются отдельные изолированные остаточные поры. О конечной усадке при спекании говорить нельзя, так как при повторном спекании брикетов вновь обнаруживается усадка. Механизм усадки при спекании заключается в объемной деформации частиц под влиянием поверхностного натяжения. Осуществляется она путем объемной самодиффузии атомов (заполнением вакансий). При этом коэффициент самодиффузии

изменяется во времени вследствие уменьшения первоначальной повышенной концентрации дефектов кристаллической решетки.

Как и упругое последствие при формовании заготовки, усадку при ее спекании необходимо учитывать при расчете и конструировании штампового инструмента. Увеличение плотности при спекании больше у заготовок, формованных при меньших давлениях. С целью получения заданных размеров, спеканные порошковые изделия подвергаются калибровке. Также калиброванием повышают некоторые свойства деталей. При калибровании порошковых деталей происходит пластическая деформация отдельных их частей.

Поскольку формование по схеме, приведенной на рис. 3, позволяет создать высокие давления, ограниченные только сопротивлением усталости штампового инструмента, и при этом достигается высокая плотность заготовок, усадка при спекании заготовок минимальная.

Библиографический список

1. 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.
2. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Петров М.Д.** Разработка технологии производства корпуса гидроцилиндра из железного порошка // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 1 (28). — С. 54–58.
3. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 2 (29). — С. 44–49.
4. **Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В., Аксененко А.Ю.** Создание рациональной преимущественной ориентировки зерен в формованных со сдвигами слоев порошковых заготовках // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 1 (32). — С. 13–20.
5. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Толмачев Н.С.** Технологичность конструкций создаваемых малогабаритных специализированных прессов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 11. — С. 3–9.
6. Специализированное штамповочное оборудование и выбор его технологических параметров / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова. — Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. — 334 с.
7. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Производство деталей из порошковых материалов на железной основе холодным формованием и последующим спеканием // Технология легких сплавов. 2008. № 4. — С. 41–49.

8. **Grigoriev S.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V.** Uprating the Uniformity of the Hardness Distribution within the Powder Billets Moulded with the Shifts of Layers // *Metallofizica I Noveichie Tekhnologii*. 2013. Том 35. Вып. 11. – С. 1527–1538.
9. **Григорьев С.Н., Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Исследование прочности заготовок деталей, формованных из железного порошка // *Перспективные материалы*. 2014. № 9. – С. 34–40.
10. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Гречников Ф.В.** Интенсификация уплотнения и упрочнения деталей из железных порошков и порошковых сталей на этапе их холодного формования перед спеканием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 5 (125). – С. 43–48.
11. **Dmitriev A.M., Korobova N.V., Grechnikov F.V.** Intensification of compaction and hardening of iron powder parts and powder steels at a stage of cold molding before sintering // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. V. 799–800. P. 307–311.
12. **Коробова Н.В., Дмитриев А.М., Толмачев Н.С., Аксененко А.Ю.** Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 7. – С. 15–19.
13. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Анализ метода интенсивного пластического деформирования и его применение при исследовании формования заготовок из железного порошка // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 9 (723). – С. 53–59.
14. **Dmitriev A.M., Korobova N.V.** Analysis of a Method of Intense Plastic Deformation and Its Application to Molding of Iron Powder Billets // *Metal Science and Heat Treatment*. Vol. 57. Nos. 9–10. January, 2016. – P. 570–575.
15. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Исследование перспективных технологий для крупносерийного производства деталей из порошковых сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 7. – С. 46–53.
16. **Dmitriev A.M., Korobova N.V.** A Study of Advanced Processes for Large-Scale Production of Parts from Powder Steels // *Metal Science and Heat Treatment*. Vol. 60. Nos. 7–8. – Pp. 457–463. DOI: 10.1007/s11041-018-0301-7
17. **Dmitriev A.M., Korobova N.V., Badalyan A.Zh.** Development and Research of Formation Technologies on Specialized Presses with Subsequent Sintering of High-Density Details from Iron-Based Powders // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. P. 216–228. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.216.
18. **Grigoriev S.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V., Fedorov S.V.** A Cold-Pressing Method Combining Axial and Shear Flow of Powder Compaction to Produce High-Density Iron Parts // *Technologies* 7, 70. 2019. Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария. 17 p. DOI: 10.3390/technologies7040070.
19. *Порошковая металлургия – безотходная, энергосберегающая технология / О.В.Роман, И.П. Габриэлов. – Минск: Беларусь, 1986. – 160 с.*

Дмитриев Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, член-корр. РАН, профессор кафедры систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
countess.olga@gmail.com

Коробова Наталья Васильевна – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mt-6@yandex.ru

Dmitriev Alexander Mikhailovich – D.Sc. of Engineering, full professor, corresponding member of Russian Academy of Sciences, professor at the sub-department of «Systems of plastic deformation» of MSUT «STANKIN»
countess.olga@gmail.com

Korobova Natalia Vasilievna – D.Sc. of Engineering, full professor, head of the sub-department of «Systems of plastic deformation» of MSUT «STANKIN»
mt-6@yandex.ru

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.735.016.2

П.В. Панфилов
P.V. Panfilov

МОДУЛЬ ДЛЯ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМ УСТРОЙСТВОМ

MODULE FOR RAPID PROTOTYPING OF MECHATRONIC DEVICE CONTROL

Приведено описание модуля для быстрого прототипирования электронных узлов мехатронных устройств. Модуль базируется на микроконтроллере STM32F103CBT6 и имеет в своем составе датчики и исполнительные устройства, актуальные для мехатронных устройств и роботов. Описаны два способа программной поддержки модуля.

The description of the module for rapid prototyping of electronic components of mechatronic devices is given. The module is based on the STM32F103CBT6 microcontroller, and includes sensors and actuators that are relevant for mechatronic devices and robots. Two ways of program support of the module are described.

Ключевые слова: управление мехатронным устройством, микроконтроллер, Cube IDE.

Keywords: mechatronic device control, microcontroller, Cube IDE.

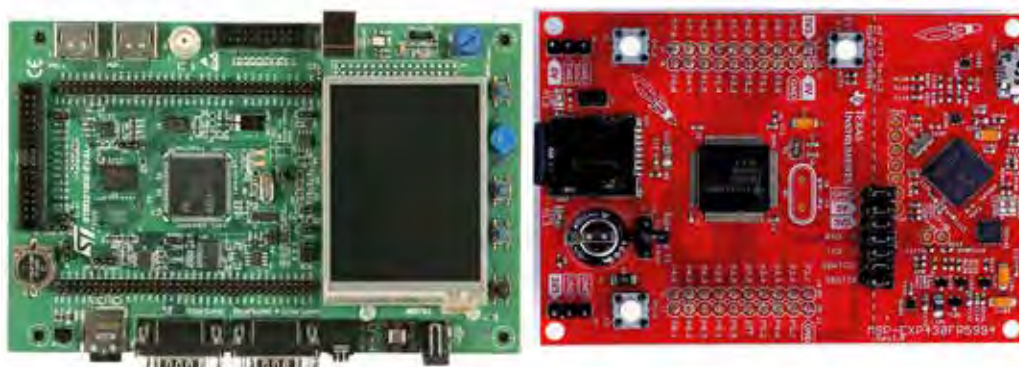
В настоящее время микроконтроллеры (МК) нашли широкое применение в сложных технических системах, содержащих модули электронного управления, от игрушек, бытовой техники, автомобилей, до космических аппаратов и роботов. Велика роль МК в робототехнике и мехатронике, благодаря легкости перепрограммирования, простоте проектирования аппаратуры, универсальности применения и малым габаритам при больших вычислительных ресурсах.

Мехатронная система – единый комплекс электро-механических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный обмен энергией и информацией, объединённый общей системой автоматического управления (возможно с элементами искусственного интеллекта) [1]. Состав компонентов типовой мехатронной системы представлен на рис. 1. Система управления такой системы может использовать МК. В мехатронной системе упрощенно выделяют три главных компонента: механическую, электронную и информационную, совокупность которых и образует систему в целом [2]. Электронная и информационная части являются важными элементами системы, без которых невозможна ее работоспособность.

При разработке мехатронной системы на этапе прототипирования требуется быстро разработать электронную часть системы и программное обеспечение (ПО) для проверки работоспособности всей системы и достижения требуемых технических характеристик. При этом часто для простых мехатронных систем используются микроконтроллеры. Для облегчения этого процесса иностранные фирмы выпускают специальные наборы разработчика (developer board). Они позволяют быстро проверить идеи, заложенные



Рис. 1. Типовая мехатронная система



а) STM32100E-EVAL

б) MSP-EXP430FR5994

Рис. 2. Примеры плат разработчика



Рис. 3. 3D-модель модуля для прототипирования мехатронных устройств

в проектируемый модуль. На рис. 2 приведены два примера таких плат от иностранных производителей.

Необходимо отметить, что обычно такие платы делаются достаточно универсальными, чтобы их можно было использовать для различных применений. Это часто бывает не очень удобно и не всегда позволяет их использовать для мехатронных систем без дополнительных внешних электронных узлов, а это усложняет их использование.

На кафедре робототехники и мехатроники МГТУ «Станкин» был спроектирован и изготовлен специальный микропроцессорный модуль для прототипирования систем управления мехатронными устройствами, учитывающий специфику их применения в робототехнике. Разработанный модуль позволяет проводить быструю разработку мехатронных устройств и может использоваться как аппаратная часть для дипломных работ бакалавров и магистров.

Макет построен на базе микроконтроллера STM32F103CBT6 (рис. 3), которой имеет множество периферийных устройств «на борту» и позволяет их использовать при разработке мехатронных устройств.

Помимо микроконтроллера в макете установлена следующая периферия:

- цветной TFT дисплей с разрешением 128×160 точек, использующий spi интерфейс контроллер st7735;
- разъем для micro sd карты (для соединения с МК используется spi интерфейс);
- радио-интерфейс на основе чипа nrf24101;
- кнопка сброса;
- 4 аналоговые кнопки и 3 светодиода;
- механический энкодер с дублированием выводов на отдельный разъем;
- разъем для программирования swd с дополнительным выводом swo;
- часовой кварц для внутренних часов STM32F103 с питанием от батарейки;

- переменный резистор, соединенный с аналоговым входом STM32F103;
- фоторезистор, соединенный с аналоговым входом STM32F103;
- датчик температуры ds18b20;
- вместо двух аналоговых входов можно сконфигурировать переключателями и использовать аппаратный uart2 STM32F103;
- датчик расстояния на чипе vl5310x;
- датчик магнитного поля на чипе hmc5883l;
- разъем интерфейса i2c, для подключения дополнительных устройств;
- узел управления шаговым двигателем на основе микросхемы uln2003;
- датчик тока для измерения тока потребления шаговым двигателем на чипе ACS70331;
- micro usb разъем для VCP или MSD;

Для работы с модулем можно использовать два подхода. Первый — это программирование в среде Arduino IDE, второй — использование профессиональных сред программирования типа Cube IDE.

Использование среды Arduino IDE

В этом варианте можно использовать среду Arduino IDE, установив через менеджер плат плату Leaf Maple mini и записав специальный загрузчик в макет. Использование МК STM32F103CBT6 позволило аппаратно эмулировать плату Leaf Maple mini, и это дает возможность использовать программное обеспечение проекта stm32duino [3].

После записи загрузчика Leaf Maple Mini в макет появляется возможность загружать ПО через USB порт, как это делается в Arduino IDE. Загрузка производится в режиме DFU mode, что требует установки драйверов VID_1EAF&PID_0003. При подключении плата определяется системой как COM порт, но в режиме загрузки прошивки переключается в режим DFU mode.

Использование такого подхода дает низкий порог входа в программирование МК, ведь работа проводится в среде Arduino, и, соответственно, «работает» весь багаж знаний, который был наработан сообществом ранее, и будут работать множество библиотек и кодов, разработанных для плат Arduino. При этом разработка мехатронной системы будет проводиться с современным 32-битным ARM микроконтроллером, имеющим тактовую частоту 72 МГц, объем флеш-памяти 128 кбайт и ОЗУ 20 кбайт, что гораздо мощнее, чем «классическая» Arduino. Значительная производительность и высокая частота позволяют решать более трудоемкие задачи типа цифровой обработки сигналов (ЦОС) и управления сложными объектами в реальном времени.

При программировании в среде Arduino модуль позволяет использовать три способа получения информации от мехатронной системы (обратная связь интерфейса человек-мехатронная система).

1. Три светодиода, которые могут использоваться для индикации различных событий и состояния про-

граммы. Это классический способ отображения состояния устройства в МК.

2. В среде Arduino можно использовать стандартный способ вывода информации — виртуальный последовательный порт, используя метод Serial.print.

3. Вывод информации на дисплей, который распаян на макете. Дисплей цветной с разрешением 160×128 точек, есть библиотека поддержки дисплея. При использовании этой библиотеки разработчик будет работать не с командами дисплея, а с графическими примитивами типа строка текста, линии, точки, прямоугольники и т. д.

В качестве органов управления в модуле также можно использовать несколько вариантов.

1. Использование стандартного способа среды Arduino — виртуальной последовательный порт, используя метод Serial.read.

2. Инкрементальный энкодер с кнопкой. Это очень удобный способ ввода. Вращение энкодера дает изменение редактируемого параметра или изменение пункта меню, а нажатие на энкодер фиксирует эти изменения.

3. Четыре аналоговые кнопки, которые используют один аналоговый вход и резистивный делитель, нажатие на кнопку изменяет напряжение на аналоговом входе, уровень которого соответствует конкретной кнопке.

В модуле смонтированы несколько датчиков и выходов для исполнительных механизмов, которые актуальны при проектировании робототехнических и мехатронных систем.

VL53L0XV2 — это самый маленький из доступных на сегодняшний день лазерных дальномеров. Он использует запатентованную технологию Time-of-Flight (ToF). Датчик обеспечивает точное измерение расстояния независимо от отражательной способности цели до 2000 мм с разрешением 1 мм. Погрешность датчика $\pm 3\%$. Луч невидим для человеческого глаза. Все показания измерений можно получить от датчика по интерфейсу I2C, который также используется для настроек сенсора.

Метод изменения расстояния фазовый [4]. Принцип работы Time-of-Flight такого дальномера иллюстрируется рис. 4. Лазер постоянно излучает световой поток, который модулируется с частотой, примерно равной 500 МГц. Фазовый лазерный дальномер не меняет длину волны самого лазера, а только модулирует её. Отраженный луч принимается фотоприемником, и его фаза сравнивается с фазой излучаемого сигнала лазера. Так как свет имеет известную скорость распространения, то при возврате луча образуется сдвиг фазы относительно излучаемого сигнала, после чего устройство рассчитывает расстояние. Лазерный излучатель работает в диапазоне 940 нм.

Вторым интересным датчиком, установленным в модуле, является трёхосевой цифровой компас (магнитометр), построенный на микросхеме HMC5883L,

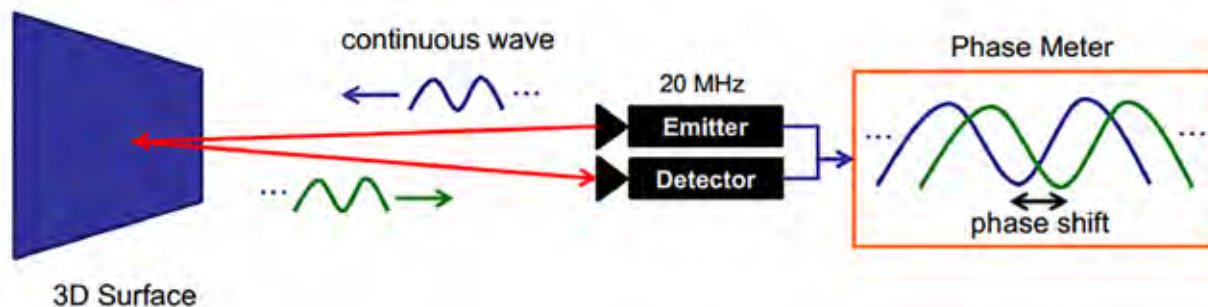


Рис. 4. Принцип работы Time-of-Flight дальномера

также работающий по шине I2C. В качестве сенсоров в чипе используется три магниторезистивных датчика. Разработчик – компания Honeywell [5]. Чувствительность датчика составляет 5 миллигаусс.

При отсутствии внешних помех и при расположении датчика в горизонтальной плоскости, проекция вектора магнитной индукции на плоскость XOY будет указывать на север. Данный датчик можно использовать как электронный компас, что особенно актуально для мобильных роботов.

В модуле предусмотрена возможность переключения с установленного механического энкодера, который используется как орган управления, на внешний оптический инкрементальный энкодер. Такие датчики получили широкое распространение в робототехнике для отслеживания угла поворота различных механизмов или перемещения их частей относительно друга. Для обработки сигналов энкодера используется аппаратный таймер МК STM32F103 [6], и это позволяет на аппаратном уровне подавлять «дребезг» контактов и не задействовать вычислительное ядро МК для подсчета управляющих импульсов. Использование аппаратного таймера дает возможность подключать оптические датчики угла поворота и оптические линейки с большим разрешением к модулю и использовать его в качестве контроллера движения.

В рамках проектирования модуля были найдены в интернете и доработаны или разработаны библиотеки для Arduino для всей установленной периферии макета. Использование этих библиотек позволит разработчику не заниматься рутинной работой по программированию конкретного датчика (работа с регистрами и памятью), а сразу перейти к программированию функционала и использованию достаточно сложных датчиков на практике, что позволяет сократить время разработки.

Использование среды Cube IDE

Использование такого подхода позволяет при разработке ПО для модуля использовать такие профессиональные инструменты программирования МК, как Cube IDE (рис. 5), IAR Embedded Workbench

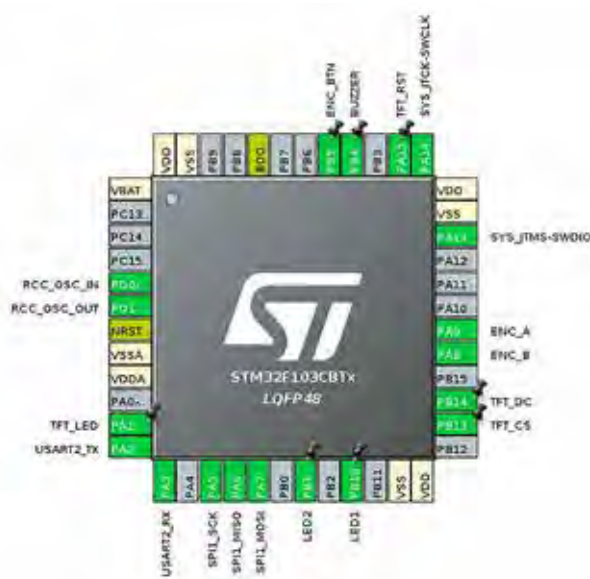


Рис. 5. Конфигурирование МК в CubeMX

EWARM IDE или Keil MDK-ARM uVision IDE. При этом к модулю можно подключать внутрисхемный программатор/отладчик ST-Link с возможностью использования дополнительной линии SWO для передачи текстовых сообщений на консоль. Все взаимодействие с макетом в этом случае происходит через него.

Использование внутрисхемного программатора/отладчика ST-Link позволяет проводить загрузку созданного кода в МК, делать пошаговое выполнение кода, ставить точки останова и просматривать значение регистров и переменных. Использование отладчика резко поднимает удобство отладки кода и поиска ошибок в нем.

В рамках проектирования модуля разработан код в Cube IDE для полного тестирования. Загрузив этот код в микроконтроллер, можно провести тест всех компонент макета и определить их работоспособность. Данное программное обеспечение удобно использовать при монтаже макетов как выходной контроль, или как рабочий пример по работе с аппаратной частью макета.

Так как у МК STM32F103 есть достаточно большие объемы памяти и вычислительные ресурсы, то при разработке кода возможно использование операционной системы (ОС), например, FreeRTOS. FreeRTOS – это операционная система с открытым исходным кодом. Можно абсолютно бесплатно и без проблем скачать её последнюю версию. Эта ОС написана на языке С с включением небольших ассемблерных вставок. В среде Cube IDE эта операционная система является встроенным компонентом, и ее легко можно использовать.

Подводя итоги, можно сказать, что разработанный модуль позволяет быстро проводить разработку и прототипирование мехатронных систем. Этот модуль можно использовать в качестве системы управления (см. рис. 1.) мехатронной системы или отдельного узла робота. Широкий функционал дает возможность использования встроенной и/или подключения внешней периферии. При этом можно использовать как простые инструменты программирования типа Arduino IDE, так и профессиональные типа Cube IDE, используя весь инструментарий профессионала типа операционных систем реального времени и отладчика. Вся информация о разработанном модуле (схемы, фото, библиотеки и разработанное ПО для тестирования) выложена в публичный доступ на github [7].

Библиографический список

1. Готлиб Б.М., Вакалюк А.А. Введение в специальность «Мехатроника» и робототехника. – Екатеринбург: Издательство УрГУПС, 2012. – 136 с.
2. Егоров О.Д., Подураев Ю.В., Буйнов М.А. Робототехнические мехатронные системы. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 326 с.
3. Arduino STM32 (проект stm32duino), – Режим доступа: https://github.com/rogerclarkmelbourne/Arduino_STM32.
4. VL53L0X World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor (Datasheet – production data) – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
5. Three-Axis Digital Compass IC HMC5883L Honeywell – Режим доступа: <http://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf>
6. AN4013 Application note: STM32 cross-series timer overview – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00042534-stm32-crossseries-timer-overview-stmicroelectronics.pdf
7. Информация о модуле прототипирования мехатронных систем. – Режим доступа: <https://github.com/pav2000/DevBoardSTM32F103CBT>.

Панфилов Павел Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
panfilov@micron.ru

Panfilov Pavel Vladimirovich – candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Robotics and mechatronics» of MSUT «STANKIN»
panfilov@micron.ru

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ГИБРИДНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF SOFTWARE FOR ANALYZING THE SPATIAL POSITION OF THE CABLE LINE OF THE HYBRID UNDERWATER ROBOTIC SYSTEM

При разработке гибридных подводных робототехнических комплексов (ПРК) на основе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) и телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) необходимо осуществлять управление длиной кабеля, соединяющего отдельные аппараты в составе комплекса. Выбор длины кабеля для заданного относительного положения аппаратов предлагается осуществлять с помощью математического моделирования. Для этого было разработано программное обеспечение, которое позволяет проводить математическое моделирование статической конфигурации кабеля между АНПА и ТПА в составе гибридного ПРК в трёхмерном пространстве и является инструментом для прикладного исследования характеристик гибридного ПРК.

Developing hybrid underwater vehicle (HUV) based on an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) and a remotely operated underwater vehicle (ROV), requires to control the length of the cable connecting the separated vehicles as part of a HUV. The selection of cable length for a given relative position of the vehicles is proposed to be carried out using mathematical modeling. Software was developed that allows mathematical modeling of the static configuration of the cable between the AUV and ROV in three-dimensional space. It is a tool for applied research of the characteristics of a HUV.

Ключевые слова: гибридный подводный робототехнический комплекс, автономный необитаемый подводный аппарат, телеуправляемый подводный аппарат, кабельная линия, программное обеспечение.

Keywords: hybrid underwater vehicle, autonomous underwater vehicle, remotely operated vehicle, cable line, software.

В области океанологии и изучения Мирового океана широко применяются подводные аппараты различных типов [2]. Однако их использование существенно ограничено особенностями, присущими каждому из типов аппаратов [6, 7].

В связи с этим в современной подводной робототехнике всё чаще проводятся исследования и разработки [1, 3] гибридных подводных робототехнических комплексов (ПРК), которые объединяют в себе разнотипные подводные аппараты. Предполагается [4], что наиболее функциональным будет являться гибридный ПРК, состоящий из телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) и автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), которые соединены между собой кабелем. Кроме того, АНПА оснащён бумом с приёмо-передатчиком, выпуск которого на поверхность позволит комплексу по радиоканалу принимать команды оператора, что фактически приведёт к реализации режима телеуправления.

При выполнении любой задачи, предполагающей самостоятельное движение каждого аппарата в

составе ПРК, кабель между ними будет испытывать существенное влияние набегающего потока [4]. Для уменьшения данного воздействия и, соответственно, уменьшения влияния кабеля на оба аппарата, необходимо осуществлять управление длиной кабеля между АНПА и ТПА.

Выбор длины кабеля предлагается осуществлять на основе результатов моделирования гибридного ПРК. Первым этапом для решения данной задачи является моделирование статической конфигурации кабельной линии ПРК с возможностью автоматического подбора длины кабеля.

Математическая модель гибридного ПРК

В качестве основы для математической модели кабеля гибридного ПРК была выбрана модель кабельной линии, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана [5], которая позволяет исследовать конфигурации кабеля в выбранной плоскости.

Кабель в данной модели аппроксимируется последовательностью стержней, соединённых шарнирами. Считается, что гидродинамические и массо-

габаритные параметры каждого стержня известны. Расчётная схема показана на рис. 1. В качестве обобщенных координат выбраны углы наклона i -го стержня φ_i по отношению к горизонтальной плоскости.

На основе данной модели в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана программа, которая по заданным упорам движителей и заданной длине кабеля вычисляет реакции кабеля на коренном и ходовом участке и определяет координаты ходового конца и, соответственно, координаты ТПА.

Однако интерес представляет обратная задача: выбор длины кабеля и вычисление создаваемых движителями сил (упоров) по заданному положению ТПА относительно АНПА. Вычисление упоров движителей необходимо для предварительной оценки возможности реализации такого положения при заданной конфигурации движительно-рулевого комплекса.

Для решения данной задачи было разработано новое программное обеспечение (ПО), которое обладает следующими возможностями:

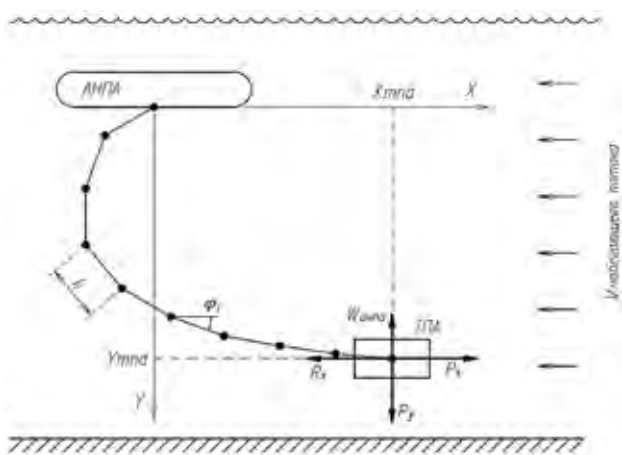


Рис. 1. Расчётная схема для разработки ПО

– расчёт конфигурации кабеля гибридного ПРК в трёхмерном пространстве для заданного положения ТПА относительно АНПА;

– выбор длины кабеля и упоров движителей для заданного положения ТПА относительно АНПА;

– численное и графическое представление результатов расчёта.

При разработке ПО был использован ряд допущений:

– кабель оказывает существенное влияние только на ТПА;

– внешнее течение действует вдоль продольной оси;

– точка крепления кабеля к ТПА совпадает с его центром масс;

– массогабаритные характеристики АНПА и ТПА не учитываются, их угловое или линейное движение не рассматривается;

– кабель аппроксимируется абсолютно жёсткими стержнями;

– звенья кабеля соединены сферическими шарнирами, первым шарниром считается шарнир, расположенный на АНПА, последним шарниром — на ТПА;

– гидродинамические силы, сила тяжести и сила Архимеда, которые действуют на звено кабеля, приложены к его середине;

– при рассмотрении условия равновесия звеньев кабеля считается, что ориентация i -го звена полностью определяется силами, которые приложены к $(i-1)$ шарниру; силы, приложенные к самому звену, не учитываются; гидродинамические силы i -го звена, а также его силы тяжести и Архимеда учитываются при определении ориентации следующего $(i+1)$ звена.

Перечень необходимых для расчёта данных и результатов расчёта приведён в табл. 1.

Разработка ПО проводилась на языке программирования C++ в кроссплатформенной среде разработки Qt Creator.

Таблица 1. Исходные и выходные данные ПО

Исходные данные	Выходные данные
– координаты ТПА	– расчётные координаты ТПА
– координаты АНПА	– рекомендуемая длина кабеля
– максимально допустимое натяжение кабеля	– величина возникающего в кабеле усилия
– параметры кабеля (диаметр, погонная масса, усилие на разрыв, максимальная длина — указывается исходя из возможностей размещения катушки кабеля на АНПА)	– упоры движителей ТПА, при которых достигается данное положение
– параметры окружающей среды (скорость течения, плотность воды и др.)	– погрешности координат ТПА
– точностные параметры (допустимая погрешность координат, шаг изменения длины кабеля, шаг изменения упоров движителей ТПА)	– графическое представление конфигурации кабеля



Рис. 2. Начальное окно ПО для моделирования конфигурации кабеля гибридного ПРК

Для наглядного представления результатов моделирования, а также для облегчения взаимодействия пользователя с ПО, было принято решение реализовать графический интерфейс. Для создания графического интерфейса были использованы встроенные средства Qt, что позволило избежать подключения сторонних библиотек.

Внешний вид начального экрана представлен на рис. 2.

Пользователю предлагается внести необходимые исходные данные или продолжить работу со значениями, установленными по умолчанию.

В качестве значений по умолчанию используются следующие данные:

- параметры кабеля [9], выбранного в качестве примера кабеля с нейтральной плавучестью;
- упоры движителей ТПА Falcon [8], выбранного в качестве примера малогабаритного ТПА.

Результат работы ПО выводится в отдельном окне, внешний вид которого показан на рис. 3.

Результаты моделирования на рис. 3 соответствуют исходным данным, указанным на начальном экране (см. рис. 2).

На экран выводятся численные результаты (расчётные значения координат аппаратов, напряжений в

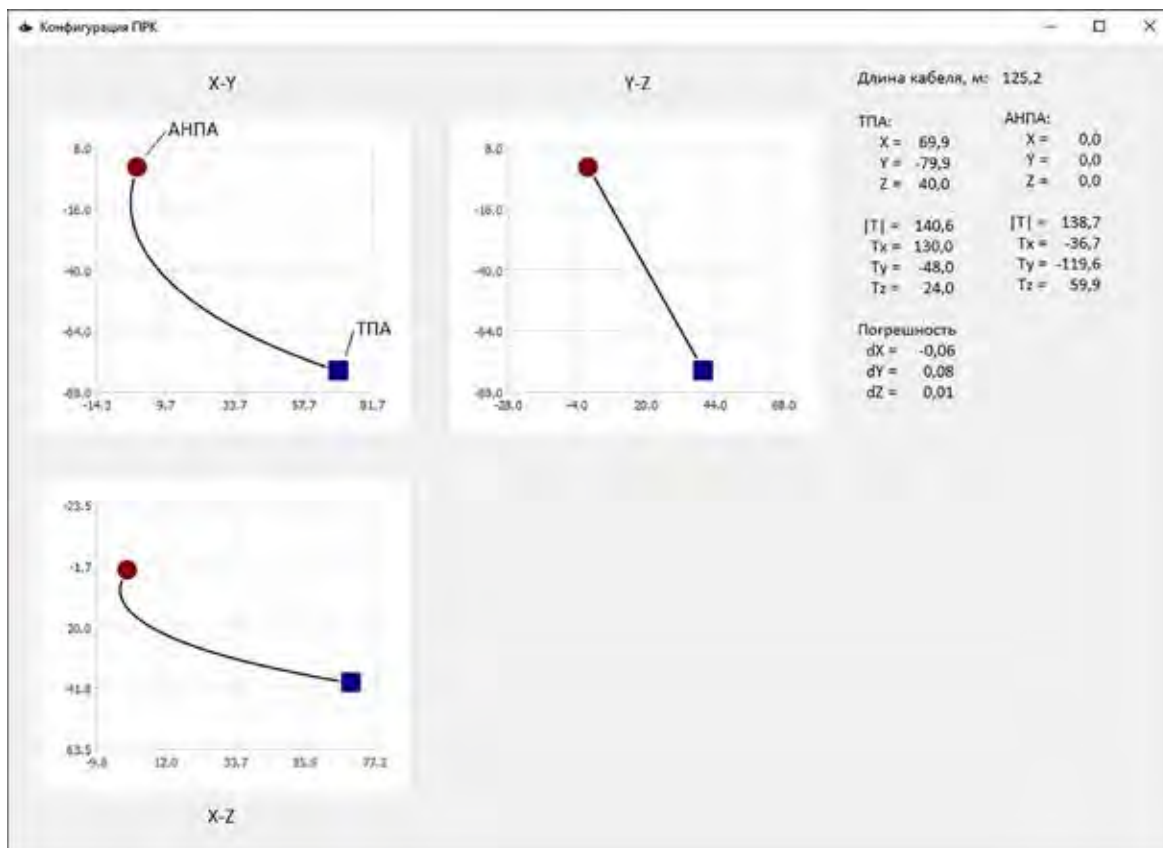


Рис.3. Окно с результатами моделирования кабеля гибридного ПРК

кабеле и рекомендуемой длины самого кабеля) и графическое представление конфигурации кабеля в виде трёх проекций на плоскости XY, YZ и XZ.

Также во время работы ПО осуществляется запись лог-файла, в который заносятся промежуточные данные о возможных конфигурациях кабеля, удовлетворяющие исходным данным. Это даёт возможность провести более глубокий анализ.

Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить математическое моделирование статической конфигурации кабеля между АНПА и ТПА в составе гибридного ПРК в трёхмерном пространстве и является инструментом для прикладного исследования характеристик гибридного ПРК.

В перспективе данное программное обеспечение может быть доработано для моделирования движения гибридного ПРК в различных режимах функционирования.

Библиографический список

1. **Алексеев Ю.К.** Двухзвенные глубоководные робототехнические системы и некоторые перспективы подводной робототехники // Технические проблемы освоения Мирового океана, 2019, № 8, с. 159–166.
2. **Борейко А.А., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф.** Тенденции и перспективы развития автономных необитаемых подводных аппаратов // Технические проблемы освоения Мирового океана, 2019, № 8, с. 4–5.
3. **Быканова А.Ю., Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Стороженко В.А.** Разработка программно-

аппаратного комплекса для измерения параметров движения подводной привязной системы «АНПА – кабель связи – поплавок – ретранслятор» // Технические проблемы освоения Мирового океана, 2019, № 8, с. 80–85.

4. **Вельтищев В.В., Аладышева Е.И.** О повышении функциональной эффективности автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции и XI молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», Нижний Архыз, 05–09 октября 2020 года. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2020, с. 77–85.

5. **Вельтищев В.В.** Проектирование движительных комплексов подводных аппаратов: учебное пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 167 с.

6. **Грибанова И.В.** Состояние и тенденции развития подводных робототехнических средств // Матрица научного познания, 2019, № 5, с. 19–22.

7. **Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф., Ремезков А.В.** Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника, 2020, № 4 (34), с. 4–14. DOI 10.37102/24094609.2020.34.4.001.

8. **Jane's.** Jane's Unmanned Maritime Vehicles and Systems Issue Four. Edited by Charles Hollosi. Coulsdon: HIS Jane's, August 2010.

9. ROV «Super Gnom Pro» technical specifications. URL: <http://geaco.eu/products/gnom/super-gnom-pro.htm> (дата обращения: 30.01.2020).

Вельтищев Вадим Викторович – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана
vzv@bmstu.ru

Аладышева Елена Игоревна – аспирант кафедры «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана
aladysheva_elena@mail.ru

Veltishchev Vadim Victorovich – D.Sc. of Engineering, head of the department «Underwater robots and vehicles» of Bauman Moscow State Technical University
vzv@bmstu.ru

Aladysheva Elena Igorevna – postgraduate at the department of «Underwater robots and vehicles» of Bauman Moscow State Technical University
aladysheva_elena@mail.ru

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОМАНЕВРЕННОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ H_{∞} ПОДХОДА

SYNTHESIS OF AN ATTITUDE CONTROL SYSTEM FOR HIGHLY MANEUVERABLE UNDERWATER VEHICLE USING H-INFINITY APPROACH

Всё чаще появляются задачи, для решения которых необходима повышенная манёвренность необитаемых подводных аппаратов (работоспособность при любых углах ориентации). Однако методика построения систем управления для таких аппаратов проработана недостаточно. В статье проведен анализ устойчивости, на основе которого предложен подход к построению системы управления с использованием алгоритма декомпозиции и H_{∞} -синтеза системы управления сепаратным каналом. Работоспособность подхода подтверждена результатами моделирования на полной нелинейной модели необитаемого подводного аппарата «Аква МО» и имеет лучшее качество в сравнении с традиционным регулятором.

Recently tasks that require increased maneuverability of uninhabited underwater vehicles (operability at any orientation angles) become more frequent. However, the methodology for design control systems for such vehicles has not been sufficiently developed. The article analyzes the stability of the system, on the basis of which an approach to the construction of a control system using the decomposition algorithm and H_{∞} -synthesis of a control system for a separate channel is proposed. The operability of the approach is confirmed by the results of simulation on the full nonlinear model of the unmanned underwater vehicle «Aqua MO» and has a better quality in comparison with the traditional controller.

Ключевые слова: высокоманевренные необитаемые подводные аппараты, подводные роботы, автономные необитаемые подводные аппараты, система управления ориентацией, H_{∞} -синтез, робастные системы управления.

Keywords: highly maneuverable unmanned underwater vehicles, underwater robots, autonomous unmanned underwater vehicles, attitude control system, H_{∞} -synthesis, robust control systems.

Введение

Традиционно необитаемые подводные аппараты (НПА) эксплуатируются при малых углах наклона (дифферента и крена). Однако область применения НПА расширяется, появляются новые задачи и требования. Так при проведении противоминных операций [1] телеуправляемый НПА (ТНПА) работает с объектами, расположенными на дне, стенах, доступ к которым может быть затруднен из-за особенностей рельефа, наличия подводных конструкций. Для решения задач необходима работа с близкого расстояния, которая возможна при большом наклоне НПА по дифференту.

Другой пример – стыковка гибридного НПА (оснащенного гибридным движительным комплексом) с корпусом корабля или другой рабочей поверхностью. Гибридные НПА эффективны при решении задач дефектоскопии, обследования подводных конструкций [2], [3]. Движительная система таких НПА позволяет управлять движением в воде за счет винтомоторных

агрегатов, а движением по рабочей поверхности за счет дополнительной движительной системы на основе гусениц или колес. Одним из этапов работы такого ТНПА является стыковка с рабочей поверхностью, для чего ТНПА разворачивается на большой угол дифферента или крена. На рис. 1 процесс стыковки проиллюстрирован на примере ТНПА «Износ», разработанного в МГТУ им. Баумана [2].

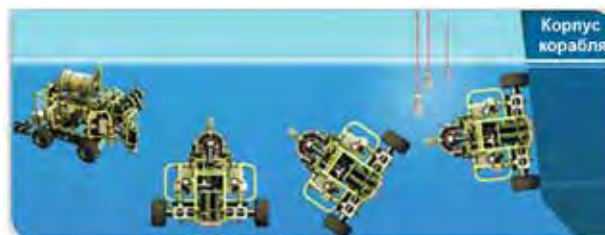


Рис. 1. Процесс стыковки ТНПА «Износ» с корпусом судна

Кроме того, управляемость во всем диапазоне углов ориентации необходима НПА, работающим в условиях ограниченного пространства (пещеры, тоннели, порты). Например, автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) UX-1 [4] был разработан для обследования и составления карты тоннелей старых затопленных шахт. Управление при большом угле дифферента используется для перемещения по вертикальным тоннелям. АНПА SUNFISH [5] разработан для обследования подводных пещер. Повышенная манёвренность необходима для работы в ограниченном пространстве, а также используется для свободного ориентирования датчиков (гидроакустической системы технического зрения, видеокамер и др.), что способствует эффективному решению задачи SLAM. Другие примеры высокоманёвренных НПА представлены в работах [6], [7]. Управление при больших наклонах используется для выполнения контактных работ, а также быстрого погружения АНПА.

Решение перечисленных задач с использованием традиционных НПА (с малыми углами наклона) требует: оснащения НПА поворотными устройствами для систем технического зрения (камер, гидроакустических устройств) или дублирования датчиков; усложнения конструкций манипуляторов или их дублирования; уменьшения габаритов НПА. Дублирование устройств, усложнение конструкции манипуляторов приведут к увеличению стоимости НПА и его габаритов. Уменьшение габаритов для повышения манёвренности уменьшает допустимую ёмкость аккумуляторов АНПА. При этом управляемость во всем диапазоне углов ориентации даёт дополнительные преимущества: позволяет работать в ограниченном пространстве, повышает манёвренность, позволяет свободно ориентировать датчики, инструменты, расширяет рабочую зону манипулятора и позволяет выполнять контактные операции с объектами, расположенными под наклоном (корпус корабля, донные объекты и др.). Таким образом, наиболее эффективным решением является разработка новых высокоманёвренных НПА, управляемых во всем диапазоне углов ориентации.

Однако система управления таких НПА должна обеспечивать требуемое качество во всем диапазоне углов ориентации. В то же время на данный момент вопрос построения системы управления НПА повышенной манёвренности разработан недостаточно. В работах [5], [8] системы управления построены на основе кватернионов. В то же время режимы движения НПА при больших углах наклона (например, повороты по курсу при углах дифферента более 45°) в работах не исследуются, а динамика движителей при анализе не учитывается. Разработка системы управления для больших углов и ее натурные испытания были проведены в [5]. Однако в работе рассматривалась частная задача работы высокоманёвренного НПА, когда угол дифферента составляет 90° , и не рассматривалось

движение с ненулевым наклоном НПА по крену или углами дифферента менее 90° .

В настоящее время вопрос работоспособности традиционных систем ориентации, использующих углы Эйлера-Крылова, при больших углах наклона исследован недостаточно, хотя решение этой проблемы практически значимо, так как позволит использовать накопленный опыт и расширить рабочие углы существующих НПА. Основной причиной отказа от использования углов Эйлера является наличие особой точки (при дифференте $\pm 90^\circ$), в которой вырождаются кинематические уравнения и появляется проблема неоднозначности описания ориентации (курс неотличим от крена) [9]. Однако на данный момент разработаны алгоритмы, которые позволят обойти недостатки углов Эйлера [10], [11], что повышает интерес к доработке традиционной системы управления для задач высокоманёвренных НПА.

Работа традиционной системы управления при больших углах наклона исследована в [12]. В работе показано, что с увеличением углов дифферента и крена качество традиционной системы управления ухудшается: усиливаются взаимовлияния между каналами, появляются динамические ошибки. При этом канал крена наиболее подвержен влиянию со стороны других каналов. Динамическая ошибка в ходе натурных экспериментов [3] достигала 50° . Для решения проблемы предложен алгоритм декомпозиции. Работоспособность подхода подтверждена в ходе натурных экспериментов на НПА «Износ» [3] (динамическая ошибка уменьшена до 5°). Однако устойчивость системы не исследована, а ввиду неточности определения параметров алгоритма декомпозиции в системе наблюдаются остаточные взаимовлияния. Таким образом, для дальнейшей разработки методики построения системы управления высокоманёвренным НПА встаёт вопрос о разработке подхода к синтезу системы управления сепаратными каналами курса, дифферента и крена, обеспечивающими низкую чувствительность к возмущениям со стороны других каналов, а также исследование устойчивости системы.

В данной работе исследуется устойчивость исходной и декомпозированной системы в соответствии с обобщенным критерием Найквиста [13]. Синтез регуляторов сепаратных каналов рассматривается как задача H_∞ -оптимизации, спроектированная таким образом, чтобы полученная система управления обладала низкой чувствительностью к возмущениям от других каналов и имела достаточные запасы устойчивости. Проверка результатов проводится методами математического моделирования на полной нелинейной модели ТНПА «Аква МО» [12]. Результаты работы алгоритма сравниваются с традиционным регулятором.

Работа структурирована следующим образом. В разделе 1 приведены уравнения математической модели НПА. В разделе 2 проведено исследование

устойчивости традиционной системы управления. В разделе 3 решена задача синтеза системы управления креном с использованием H_∞ -подхода. Результаты экспериментального исследования полученного подхода на полной нелинейной математической модели НПА приведены в разделе 4.

1. Математическая модель

Математическая модель должна качественно отражать особенности НПА как объекта управления, при этом оставаться применимой для аналитических исследований. В данной работе для моделирования используется полная нелинейная модель НПА на основе работ [12], [14]. Нелинейная модель линеаризована для худших с точки зрения устойчивости условий и используется для синтеза и анализа. Математическая модель НПА включает в себя модель кинематики, динамики и движителей.

Ориентация НПА описывается как положение системы координат $Oxuz$, связанной с аппаратом, относительно базовой системы координат. В качестве базовой системы координат выбирают полусвязанную систему координат $Ox_g y_g z_g$, центр которой совпадает с полюсом аппарата. Она перемещается с НПА, но не изменяет направления своих осей. Полюс связанной с НПА системы координат $Oxuz$ также совпадает с полюсом НПА, ось Ox направлена вдоль продольной оси в носовую часть аппарата, ось Oy лежит в диаметральной плоскости и направлена вверх, ось Oz направлена на правый борт. Традиционно ориентация НПА описывается тремя последовательными поворотами системы координат $Oxuz$ на углы Эйлера-Крылова: ψ курса (вокруг оси Oy_g), дифферента ϑ (вокруг промежуточного положения оси Oz) и крена γ (вокруг оси Ox) относительно полусвязанной системы координат $Ox_g y_g z_g$.

Кинематические уравнения движения НПА задаются уравнениями Эйлера:

$$\dot{\eta} = P(\vartheta, \gamma)v,$$

$$P(\vartheta, \gamma) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\tan \vartheta \cos \gamma & \tan \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $\dot{\eta} = [\dot{\psi} \dot{\vartheta} \dot{\gamma}]^T$ – вектор угловых скоростей по курсу, дифференту и крену соответственно, $v = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – вектор угловых скоростей вращения НПА вокруг осей Ox, Oy, Oz ; $P(\vartheta, \gamma)$ – матрица кинематических уравнений в углах Эйлера-Крылова.

Модель динамики НПА рассматривается для малых скоростей. Нелинейная модель описана в работе [14] и имеет следующий вид:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + w' \quad (2)$$

где $M = \text{diag}\{J_x + \lambda_{44}, J_y + \lambda_{55}, J_z + \lambda_{66}\}$ – матрица

массо-инерционных характеристик НПА и присоединенной жидкости; J_x, J_y, J_z – моменты инерции, а $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ – присоединенные моменты инерции НПА относительно осей Ox, Oy, Oz соответственно; $\dot{v} = [\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z]^T$ – вектор угловых ускорений НПА в системе координат $Oxuz$; $D(v) = -\text{diag}\{C_{\omega_x} + C_{\omega_x|\omega_x}, C_{\omega_y} + C_{\omega_y|\omega_y}, C_{\omega_z} + C_{\omega_z|\omega_z}\}|\omega_z\}$ – матрица гидродинамических сил сопротивления; $C_{\omega_x}, C_{\omega_x|\omega_x}, C_{\omega_y}, C_{\omega_y|\omega_y}, C_{\omega_z}, C_{\omega_z|\omega_z}$ – коэффициенты гидродинамического сопротивления вращательному движению НПА вокруг осей Ox, Oy, Oz соответственно; $g(\eta)$ – вектор моментов гидростатических сил, действующих на НПА; $\tau = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T$ – вектор моментов, создаваемых движительно-рулевым комплексом; $w' = [w'_x \ w'_y \ w'_z]^T$ – вектор моментов, вызванных внешними возмущениями, которые действуют на НПА; $C(v)$ – матрица моментов от центробежной силы инерции и силы инерции Кориолиса, которая имеет вид:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & -(I_z + \lambda_{66})\omega_z & (\lambda_{55} + I_y)\omega_y \\ (\lambda_{66} + I_z)\omega_z & 0 & -(I_x + \lambda_{44})\omega_x \\ -(I_y + \lambda_{55})\omega_y & (\lambda_{44} + I_x)\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Исходя из требований к конструкции высокоманевренных НПА – совмещение центра масс и центра водоизмещения, с целью свести к нулю влияние гидростатических моментов $g(\eta)$, для упрощения анализа примем метацентрическую высоту нулевой.

Проведем линеаризацию уравнения (2) для худшего с точки зрения устойчивости случая (когда $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$). Преобразуем полученные уравнения по Лапласу и получим следующие передаточные функции вращательно движения НПА, которые будем использовать при синтезе:

$$W_{\text{пaj}}(s) = \frac{\omega_j(s)}{\tau_j(s)} = \frac{K_{\text{пaj}}}{T_{\text{пaj}}s + 1}, j = x, y, z \quad (4)$$

где $K_{\text{пaj}} = \frac{1}{C\omega_{j1}}$, $T_{\text{пaj}} = \frac{I_j + \lambda_{kk}}{C\omega_{j1}}$ – коэффициент

усиления и постоянная времени передаточной функции динамики вращательного движения НПА.

В соответствии с работой [14] динамика винтомоторного агрегата (двигательно-движительного устройства на основе гребного винта) может быть описана аperiодическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{двj}}(s) = \frac{\tau_j(s)}{U_j(s)} = \frac{K_{\text{двj}}}{T_{\text{двj}}s + 1}, j = x, y, z \quad (5)$$

где U_j – напряжение, поданное на двигатель; $K_{\text{двj}}$ – коэффициент усиления, $T_{\text{двj}}$ – постоянная времени агрегата.

Математическая модель динамики НПА для дальнейших исследований может быть записана следующим образом:

$$W_j(s) = \frac{\omega_j(s)}{U_j(s)} = W(s)W_{\text{пaj}}(s), j = x, y, z \quad (6)$$

2. Анализ устойчивости

Известны два подхода к построению системы управления ориентацией НПА: подход с демпфирующей скоростной связью по угловой скорости $\dot{\eta}$ по курсу, дифференту и крену (система первого типа) [14], [15], подход с демпфирующей обратной связью по вектору угловой скорости v относительно связанных с НПА осей (система второго типа) [7]. Обобщенная структурная схема, подходящая для описания каждого из подходов, приведена на рис. 2.

Расхождение между заданными и текущими значениями по курсу, дифференту и крену, заданные вектором $\varepsilon_\eta = [\varepsilon_\psi, \varepsilon_\vartheta, \varepsilon_\gamma]^T$, и текущие угловые скорости $\dot{\eta} = [\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma}]^T$ поступают в регуляторы сепаратных каналов управления курсом, дифферентом и креном НПА, представленных матрицей $W_{рег\eta}(s)$.

Сформированные управляющие сигналы каналов управления курсом, дифферентом и креном $U_\eta = [U_\psi, U_\vartheta, U_\gamma]^T$ преобразуются в управляющие сигналы $U_v = [U_x, U_y, U_z]^T$ относительно системы координат, связанной с НПА. При этом используется матрица $P^{-1}(\vartheta, \gamma)$, обратная по отношению к матрице $P(\vartheta, \gamma)$, представленной в (1). Управляющие сигналы подаются в локальный контур управления угловой скоростью или поступают на движительно-рулевой

комплекс НПА. Закон управления, в соответствии с которым формируются управляющие сигналы на движительный комплекс, имеет вид:

$$U_v = P^{-1}(\vartheta, \gamma)W_{рег}(p)[\varepsilon_\eta \dot{\eta}]^T - K_d v, P^{-1}(\vartheta, \gamma) = \begin{bmatrix} \sin(\vartheta) & 0 & 1 \\ \cos(\gamma) \cos(\vartheta) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) \cos(\vartheta) & \cos(\gamma) & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $W_{рег}(s) = [W_{рег\eta_1}(s) W_{рег\eta_2}(s)]$, $W_{рег\eta_1}(s) = \text{diag}\{W_{рег\psi_1}(s) W_{рег\vartheta_1}(s) W_{рег\gamma_1}(s)\}$ – функции регуляторов позиционной обратной связи, $W_{рег\eta_2}(s) = \text{diag}\{W_{рег\psi_2}(s) W_{рег\vartheta_2}(s) W_{рег\gamma_2}(s)\}$ и $K_d = \text{diag}\{K_{dx} K_{dy} K_{dz}\}$ – регуляторы скоростной обратной связи по векторам $\dot{\eta}$ и v соответственно. В случае системы первого типа демпфирующая скоростная связь осуществляется по вектору угловых скоростей $\dot{\eta}$, т. е. $W_{рег\eta_2} \neq 0_{3 \times 3}, K_d = 0_{3 \times 3}$. Для системы второго типа демпфирующая скоростная связь осуществляется за счет вектора угловых скоростей v , т. е. $K_d \neq 0_{3 \times 3}, W_{рег\eta_2} = 0_{3 \times 3}$. В работе [12] получена передаточная матрица $W(s)$ разомкнутой системы для второго случая, которая имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{1}{s} P(\vartheta, \gamma) W_v(s) P^{-1}(\vartheta, \gamma) W_{рег\eta_1}(s) \varepsilon_\eta = \frac{1}{s} W(s) \varepsilon_\eta, \quad (8)$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_{рег\psi} (W_y \cos^2 \gamma + W_z \sin^2 \gamma) & \frac{\sin 2\gamma}{2 \cos \vartheta} W_{рег\vartheta} (W_y - W_z) & 0 \\ \frac{1}{2} \sin 2\gamma \cos \vartheta W_{рег\psi} (W_y - W_z) & W_{рег\vartheta} (W_z \cos^2 \gamma + W_{yU} \sin^2 \gamma) & 0 \\ \sin \vartheta W_{рег\psi} (W_x - W_y \cos^2 \gamma - W_z \sin^2 \gamma) & \frac{1}{2} \sin 2\gamma \tan \vartheta W_{рег\vartheta} (W_y - W_z) & W_{рег\gamma} W_x \end{bmatrix}$$

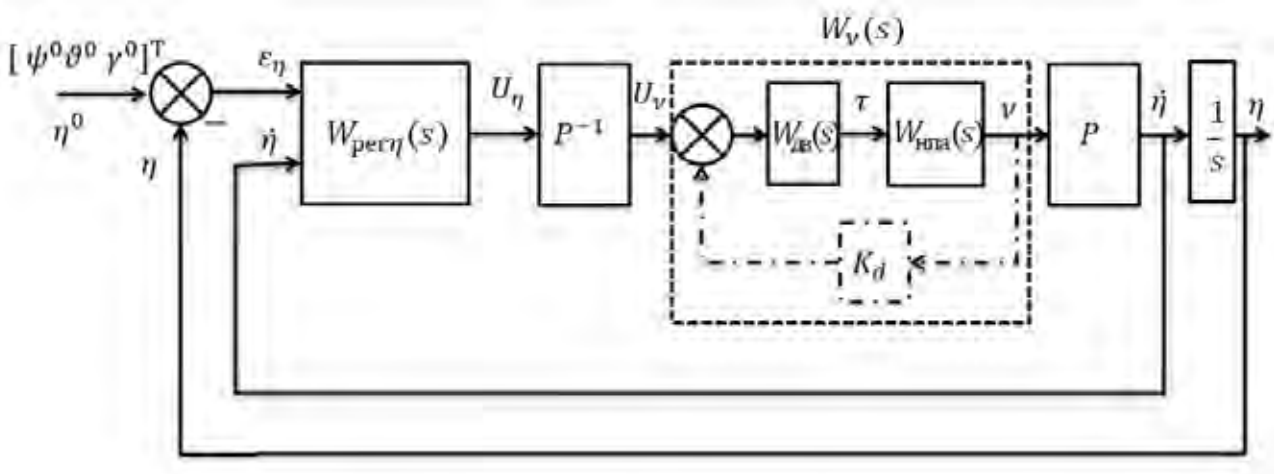


Рис. 2. Структурная схема системы управления ориентацией НПА

где $W_v(s) = \text{diag}\{W_x(s), W_y(s), W_z(s)\}$ – передаточная матрица той части системы, которая находится между матрицами $P(\vartheta, \gamma)$ и $P^{-1}(\vartheta, \gamma)$ (см. рис. 2), передаточные функции $W_x(s), W_y(s), W_z(s)$ вычисляются в соответствии с (6), если $K_{dv} = 0_{3 \times 3}$; $W_{\text{рег}\alpha}(s) = W_{\text{рег}\alpha 1}(s), \alpha = \psi, \vartheta, \gamma$ – передаточные функции регулятора.

Несмотря на то, что передаточная функция $W(s)$ получена для системы второго типа, она может использоваться для анализа устойчивости системы первого типа, в том случае, если принять задающие воздействия в системе нулевыми (см. рис. 3). Тогда передаточную функцию регулятора следует вычислять следующим образом:

$$W_{\text{рег}\alpha}(s) = W_{\text{рег}\alpha 1}(s) + sW_{\text{рег}\alpha 2}(s), \alpha = \psi, \vartheta, \gamma \quad (9)$$

Такое представление передаточной функции регулятора в (8) позволит использовать выражение (8) для анализа устойчивости систем и первого, и второго типа.

Вид передаточной матрицы $W(s)$ позволяет сделать вывод о том, что СУ ориентацией НПА многосвязна. С ростом углов наклона появляются следующие особенности:

1. С ростом угла крена изменяются передаточные функции диагональных элементов передаточной матрицы системы.
2. С ростом угла дифферента усиливаются взаимодействия между каналами.
3. Контур крена наиболее подвержен возмущающим воздействиям со стороны других каналов.

Структура системы управления, характеризующаяся уравнениями (8) такова, что применение каких-либо особых техник к синтезу регуляторов сепаратных каналов не решит проблему связи между каналами. Поэтому в работе [12] предложено использовать алгоритм декомпозиции, который приводит представленную в (8) матрицу $W(s)$ к диагональному виду. Для декомпозиции системы матри-

ца P^{-1} заменена на матрицу P^{-1} следующего вида:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \sin(\vartheta) \frac{W'_y(s)}{W'_x(s)} & 0 & 1 \\ \cos(\gamma) \cos(\vartheta) & \sin(\gamma) \frac{W'_z(s)}{W'_y(s)} & 0 \\ -\sin(\gamma) \cos(\vartheta) \frac{W'_y(s)}{W'_z(s)} & \cos(\gamma) & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $W'_x(s), W'_y(s), W'_z(s)$ – используемые в декомпозирующем алгоритме передаточные функции, которые определяются как оценки передаточных функций $W_x(s), W_y(s), W_z(s)$ НПА. При использовании алгоритма декомпозиции передаточная матрица $W(s)$ принимает вид:

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_{\text{рег}\psi}(s)W_{11}(s) & W_{\text{рег}\vartheta}(s)W_{12}(s) & 0 \\ W_{\text{рег}\varpsi}(s)W_{21}(s) & W_{\text{рег}\vartheta}(s)W_{22}(s) & 0 \\ W_{\text{рег}\psi}(s)W_{31}(s) & W_{\text{рег}\vartheta}(s)W_{32}(s) & W_{\text{рег}\gamma}(s)W_x(s) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } W_{11}(s) = (W_y(s) \cos^2(\gamma) + \frac{W_z(s)W'_y(s)}{W'_z(s)} \sin^2(\gamma));$$

$$W_{12}(s) = \frac{\sin(2\gamma)}{2 \cos(\vartheta)} \left(\frac{W_y(s)W'_z(s)}{W'_y(s)} - W_z(s) \right);$$

$$W_{21}(s) = \frac{\sin(2\gamma)}{2 \cos(\vartheta)} \left(\frac{W_y(s)W'_z(s)}{W'_y(s)} - W_z(s) \right);$$

$$W_{22}(s) = W_z \cos^2(\gamma) + \frac{W_y(s)W'_z(s)}{W'_y(s)} \sin^2(\gamma);$$

$$W_{31}(s) = \sin(\vartheta) \left(\frac{W_x(s)W'_y(s)}{W'_x(s)} - \left(W_y(s) \cos^2(\gamma) + \frac{W_z(s)W'_y(s)}{W'_z(s)} \sin^2(\gamma) \right) \right);$$

$$W_{32}(s) = \frac{1}{2} \sin(2\gamma) \text{tg}(\vartheta) \left(W_z(s) - \frac{W_y(s)W'_z(s)}{W'_y(s)} \right).$$

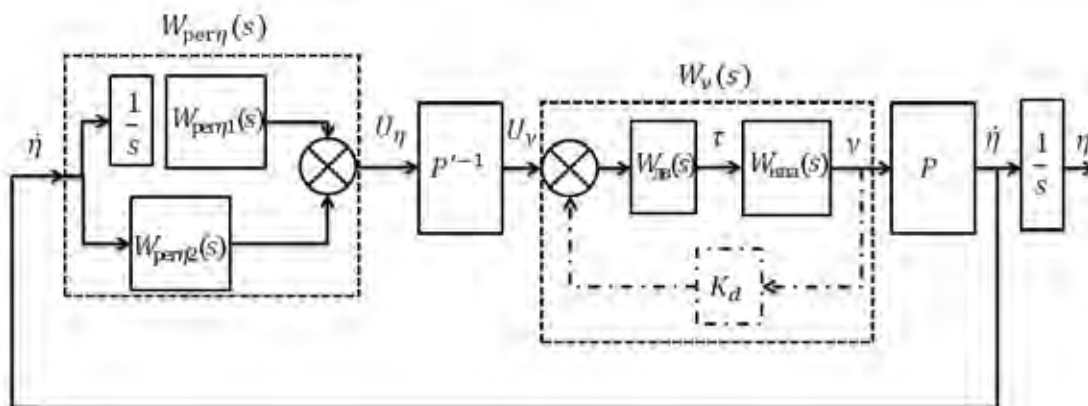


Рис. 3. Схема для анализа устойчивости

Если параметры декомпозирующего алгоритма определены точно, т. е. $W'_x(s) = W_x(s)$, $W'_y(s) = W_y(s)$, $W'_z(s) = W_z(s)$ то передаточная матрица (11) принимает диагональный вид, и каналы управления курсом, дифферентом и креном становятся независимы друг от друга. В том случае, если параметры определены неточно, то для передаточной матрицы декомпозированной системы справедливы выводы, сделанные для передаточной матрицы исходной системы (8). Из передаточной матрицы (11) можно получить передаточную матрицу исходной системы (8), если задать параметрам декомпозирующего алгоритма единичные значения:

$$W'_x(p) = W'_y(p) = W'_z(p) = 1 \quad (12)$$

Для анализа устойчивости системы управления ориентацией НПА рассмотрим схему с нулевыми заданными значениями, которая представлена на рис 3. Данная схема подходит для анализа устойчивости систем управления и первого, и второго типа.

$$\left[\lambda^2(s) - \frac{\lambda(s)}{s} \left(\sin^2(\gamma) \left(W_z(s) - \frac{W'_z(s)}{W'_y(s)} W_y(s) \right) \left(\frac{W'_y(s)}{W'_z(s)} W_{\text{пер}\psi}(s) - W_{\text{пер}\vartheta}(s) \right) + W_y(s) W_{\text{пер}\psi}(s) + W_z(s) W_{\text{пер}\vartheta}(s) \right) + \frac{1}{s^2} W_{\text{пер}\vartheta}(s) W_{\text{пер}\psi}(s) W_z(s) W_y(s) \right] \left[\lambda(s) - \frac{1}{s} W_{\text{пер}\gamma}(s) W_x(s) \right] = 0 \quad (14)$$

Собственные числа матрицы можно найти, используя уравнения:

$$\begin{cases} \lambda_{1,2}(s) = \frac{1}{2s} \left(W(s) \pm \sqrt{W(s)^2 - 4W_{\text{пер}\psi}(s)W_{\text{пер}\vartheta}(s)W_z(s)W_y(s)} \right), \\ \lambda_3(s) = \frac{1}{s} W_{\text{пер}\gamma}(s) W_x(s), \end{cases} \quad (15)$$

где $W(s) = \sin^2(\gamma) \left(W_z(s) - \frac{W'_z(s)}{W'_y(s)} W_y(s) \right) \left(\frac{W'_y(s)}{W'_z(s)} W_{\text{пер}\psi}(s) - W_{\text{пер}\vartheta}(s) \right) + W_y(s) W_{\text{пер}\psi}(s) + W_z(s) W_{\text{пер}\vartheta}(s)$, при этом $\vartheta \neq \pm 90^\circ$.

Из уравнений для определения собственных чисел можно сделать следующие выводы.

Собственное число λ_3 , соответствующее каналу управления креном, не зависит от углов наклона НПА. Следовательно, синтез канала управления креном можно проводить независимо от каналов курса и дифферента.

Пара собственных чисел $\lambda_{1,2}$, соответствующих каналам управления по курсу и дифференту, в общем случае не зависит от наклона НПА по углу дифферента, но зависит от наклона НПА по крену.

В случае недекомпозированной системы пара собственных чисел $\lambda_{1,2}$ не зависит от угла крена, если передаточные функции вращения НПА вокруг осей Oy, Oz или передаточные функции регуляторов по курсу $W_{\text{пер}\psi}$ и дифференту $W_{\text{пер}\vartheta}$ совпадают, т. е. $W_y(s) = W_z(s)$ или $W_{\text{пер}\psi}(s) = W_{\text{пер}\vartheta}(s)$ и при этом вы-

используем необходимые и достаточные условия устойчивости системы управления ориентацией НПА по критерию Найквиста, в соответствии с теоремой, приведенной в работе [13]. Для анализа устойчивости системы необходимо получить выражения для собственных значений $\lambda_i(s)$ передаточной матрицы $W(s)$. Так как при выполнении условия (12) из передаточной матрицы декомпозированной системы можно получить передаточную матрицу исходной системы, анализ матрицы (11) позволит найти условия устойчивости как декомпозированной, так и недекомпозированной системы.

Собственные значения $\lambda_i(s)$ передаточной матрицы (11) находим из уравнения:

$$\det[\lambda E_m - W(s)] = 0 \quad (13)$$

Характеристическое уравнение системы примет вид:

полняются условия устойчивости отдельных каналов управления курсом и дифферентом.

Если элементы декомпозирующего алгоритма $W'_y(s)$, $W'_z(s)$ определены точно, то устойчивость системы зависит только от устойчивости отдельных каналов курса, дифферента и крена. Точность определения $W'_x(s)$ не влияет на устойчивость системы.

В случае неточного определения параметров декомпозирующего алгоритма крен остается каналом, наиболее подверженным влияниям со стороны управляющих воздействий по курсу и дифференту. При этом с ростом угла крена изменяются условия устойчивости каналов управления курсом и дифферентом.

4. Подход к синтезу отдельного канала

Одно из основных требований к отдельному каналу – низкая чувствительность к возмущающим воз-

действиям со стороны других каналов. Для успешной реализации на практике полученных законов управления необходимо, чтобы построенная СУ имела достаточные запасы устойчивости по фазе и амплитуде. Один из распространенных способов решения таких задач – использование H_∞ – подхода к синтезу регуляторов [16].

Уравнения линеаризованного канала в стандартной форме для случая, когда углы наклона по дифференту и крену равны нулю, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u_x \\ y &= Cx \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-C_{\omega_{ij}}}{T_i + \lambda_{ij}} & \frac{1}{T_i + \lambda_{ij}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{\text{дв}i}} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{\text{дв}i}}{T_{\text{дв}i}} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{\text{дв}i}}{T_{\text{дв}i}} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $x = [\alpha \ \dot{\alpha} \ \tau_i]^T$ – вектор переменных состояния НПА, причём $i = y, z, x$; $\alpha = \psi, \vartheta, \gamma$ – угол курса, дифферента или крена, w – внешнее возмущение со стороны других каналов, приведенное ко входу движительного комплекса НПА, u_α – управляющее напряжение на движительный комплекс НПА, y – вектор измеряемых переменных.

Уравнения искомого регулятора имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c y \\ u &= C_c x_c + D_c y \end{aligned} \quad (17)$$

где x_c – вектор состояния регулятора, порядок которого не превышает порядка объекта управления, матрицы A_c, B_c, C_c, D_c регулятора получим при решении задачи синтеза СУ.

Синтез регулятора проведем, исходя из следующих требований к системе. Значение динамической ошибки от возмущающих воздействий других каналов ограничено величиной $\Delta_\alpha = 5^0$. Полученная система должна иметь запасы устойчивости основного и скоростного контуров не менее 10 дБ по амплитуде ΔL и 42° по фазе $\Delta \varphi$. При этом радиус запасов устойчивости в точках «а», «б», «с», отмеченных на рис. 4, должен быть не менее 0.75. Имеется в виду запас устойчивости системы, связь в которой разомкнута в одной из указанных точек её схемы.

Структурная схема, используемая при синтезе регулятора, приведена на рис. 4. В схеме введены четыре регулируемые переменные: z_1 – взвешенный коэффициентом Q_1 угол ориентации (курс, дифферент или крен), z_2 – взвешенная коэффициентом Q_2 угловая скорость (по курсу, дифференту или крену), z_3 – итоговый управляющий сигнал, поступающий на

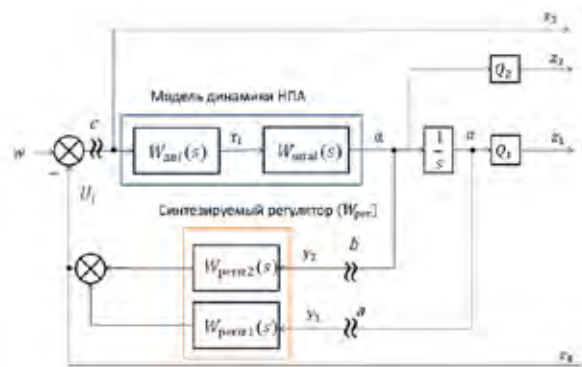


Рис. 4. Схема синтеза сепаратного канала

вход движительного комплекса, z_4 – управляющий сигнал, сформированный регуляторами сепаратного канала. Данные переменные составляют вектор регулируемых переменных $z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T$.

Возмущающее воздействие w представляет собой воздействие со стороны других каналов. При решении задачи H_∞ оптимизации минимизируется норма передаточной матрицы T_{zw} системы, связывающей вектор регулируемых переменных z с внешним возмущением w . Передаточная матрица T_{zw} имеет следующую структуру:

$$z = T_{zw}(s)w = [T_{z_1w}(s) T_{z_2w}(s) T_{z_3w}(s) T_{z_4w}(s)]^T w \quad (18)$$

В результате решения задачи синтеза для передаточной матрицы T_{zw} , а, значит, и для её компонент $T_{z_1w}(s), T_{z_2w}(s), T_{z_3w}(s), T_{z_4w}(s)$, будет выполняться условие:

$$||T_{z_1w}(j\omega)||_\infty \leq \gamma', \quad (19)$$

где γ' – заданный или минимизируемый параметр.

Выполнение условия (18) для передаточных функций $T_{z_1w}(s)T_{z_2w}(s)$ при соответствующем выборе весовых коэффициентов Q_1, Q_2 обеспечивает низкую чувствительность системы к возмущениям со стороны других каналов, а для передаточных функций $T_{z_1w}(s), T_{z_2w}(s), T_{z_3w}(s)$ – обеспечивает запасы устойчивости системы в точках «а», «б», «с», отмеченных на рис. 4. Таким образом, предложенная постановка задачи позволит получить регулятор канала крена, обеспечивающий малую динамическую ошибку при совместной работе каналов и запасы устойчивости, достаточные для практического применения регулятора.

Уравнения обобщенного объекта для рассматриваемой задачи представлены в стандартной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_g x + B_g \begin{bmatrix} \bar{w} \\ u_x \end{bmatrix}, \\ z &= C_1 x + D_{11} \bar{w} + D_{12} u_x, \\ y &= Cx + D_{21} \bar{w} + D_{22} u_x, \end{aligned} \quad (20)$$

где матрицы обобщенного объекта имеют вид:

$$A_g = A, B_g = [B_1 B_2], C_g = \begin{bmatrix} C_1 \\ C \end{bmatrix}, D_g = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{K}{T} \end{bmatrix}^T, C_1 = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{11} = [0 \ 0 \ Q_3 \ 0]^T, D_{12} = [0 \ 0 \ Q_3 \ Q_4]^T,$$

$$D_{21} = D_{22} = [0_{1 \times 4}]^T \quad (21)$$

5. Результаты моделирования

Вычислительный эксперимент проведен на нелинейной модели НПА «АКВА-МО», описание которой приведено в работе [12]. На первом этапе проведен синтез сепаратных каналов по предложенной методике. На следующем этапе работа системы управления проверена с учетом алгоритма декомпозиции для худших условий, соответствующих повороту по курсу (180°) при большом наклоне по дифференту (80°) и крену (45°). Тестовое движение аналогично представленному в работе [12], где также использовался алгоритм декомпозиции и традиционный регулятор сепаратного канала. Качество полученного результата сравнивается с качеством системы управления из работы [12].

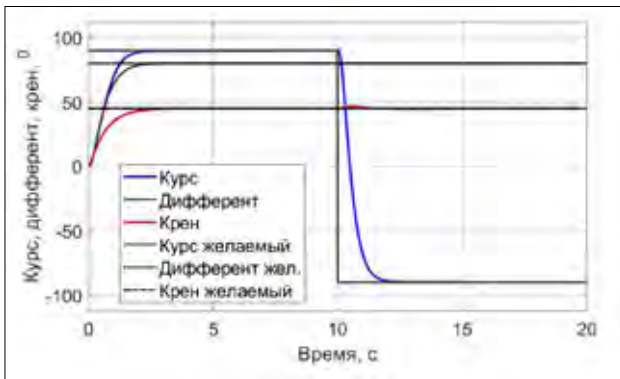


Рис. 5. Переходные процессы в системе при выполнении тестового движения

При синтезе регулятора использовался Matlab-пакет Robust Control Toolbox, использующий технику линейных матричных неравенств (LMI). Весовые коэффициенты Q_1, Q_2 были приняты равными 200. Регуляторы, полученные для канала крена, имеют вид:

$$W_{рег\gamma 1} = \frac{1.289 \cdot 10^8 (p - 3995)(p + 689)}{(p + 2.089 \cdot 10^5)(p + 9297)(p + 1265)},$$

$$W_{рег\gamma 2} = \frac{3.27 \cdot 10^9 (p + 9261)(p + 11.62)}{(p + 2.089 \cdot 10^5)(p + 9297)(p + 1265)}.$$

Для канала курса:

$$W_{рег\psi 1} = \frac{2.0069 \cdot 10^6 (p + 3996)(p + 270.7)}{(p + 26930)(p + 839.5)(p + 436.9)},$$

$$W_{рег\psi 2} = \frac{1.1991 \cdot 10^8 (p + 834.5)(p + 11.02)}{(p + 26930)(p + 839.5)(p + 436.9)},$$

а для канала дифферента:

$$W_{рег\delta 1} = \frac{65.327 (p + 2151)(p + 15.19)}{(p + 521.7)(p + 20.64)},$$

$$W_{рег\delta 2} = \frac{5877 (p + 21.21)(p + 10.09)}{(p + 521.7)(p + 20.64)}.$$

Радиусы запасов устойчивости, запасы устойчивости по фазе и амплитуде в сепаратных каналах с синтезированными регуляторами показаны в табл. 1. Параметры приведены для систем управления, разомкнутых в точках «а», «b», «с» (рис. 4) и соответствуют заданным требованиям, описанным в разделе 4.

Переходные процессы при выполнении тестового движения представлены на рис. 5. Они имеют апериодический характер. Время переходных процессов не превышает 3 секунд, а динамическая ошибка в канале крена составила 2°, при том, что при использовании традиционного регулятора с алгоритмом декомпозиции [12] она составляла 23°. То есть динамическая ошибка уменьшена в десять раз по сравнению с ошибкой при использовании традиционного регулятора.

Таблица 1. Параметры сепаратных каналов

Канал	γ'	Скоростной контур (точка «b»)		Позиционный контур (точка «а»)		Радиусы запасов устойчивости		
		ΔL , дБ	ϕ , °	ΔL , дБ	ϕ , °	r_c	r_b	r_a
Курс	1.0259	22.3	92.8	70.6	76.5	0.986	0.984	0.833
Дифферент	1.0317	∞	89.3	25.3	79.2	0.982	0.981	0.866
Крен	1.0595	-24.5	84.5	36.2	84.5	0.968	0.968	0.931

Заключение

В работе получено условие устойчивости системы управления ориентацией НПА для традиционного подхода с использованием углов Эйлера-Крылова для исходной системы и системы с алгоритмом декомпозиции [12]. На условие устойчивости не влияет наклон НПА по дифференту (для случая, когда $\vartheta \neq 90^\circ$), однако влияет изменение крена. Предложен подход к синтезу сепаратных каналов, обеспечивающий низкую чувствительность к возмущениям со стороны других каналов и обеспечивающий достаточные запасы устойчивости. Задача синтеза решена с использованием H_∞ – подхода.

Результаты моделирования показали, что предложенный регулятор уменьшил динамическую ошибку в канале крена в 10 раз по сравнению с системой, использующей традиционный регулятор. При этом полученная система имеет достаточные запасы устойчивости (по амплитуде более 22 дБ, по фазе более 76°). Кроме того, полученный регулятор имеет невысокий порядок и может быть реализован на практике. Но синтезированная система имеет ограничение. Она неработоспособна при наклоне по углу дифферента $\pm 90^\circ$, что представляет интерес для дальнейших исследований.

Библиографический список

1. **Reed S.E., Wood J., and Haworth C.** The detection and disposal of IED devices within harbor regions using AUVs, smart ROVs and data processing/fusion technology. 2010 International WaterSide Security Conference, IEEE, 2010, с. 1–7. doi: 10.1109/WSSC.2010.5730276.
2. **Вельтищев В.В., Егоров С.А., Григорьев М.В.** и др. Роботизированная технология освидетельствования подводной части судна / В.В. Вельтищев // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 1 (21). – с. 15–24.
3. **Gavrilina E.A., Chestnov V.N., Kropotov V.N.** A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles. 2019 18th European Control Conference (ECC), IEEE, 2019, с. 3334–3339. doi: 10.23919/ECC.2019.8795751
4. **Suarez Fernandez R.A.** и др. Motion Control of Underwater Mine Explorer Robot UX-1: Field Trials. IEEE Access, vol. 7, 2019, с. 99782–99803. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930544.
5. **Richmond K.**, и др. SUNFISH@: A human-portable exploration AUV for complex 3D environments. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, 2018, с. 1–9.
6. **Sakagami N.** et al., (2010) «Design and development of an attitude control system for a human-sized ROV,» 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision, IEEE, с. 2141–2146. doi: 10.1109/ICARCV.2010.5707896.
7. **Ferreira B.M., Jouffroy J., Matos A.C., Cruz N.A.** Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down. IEEE, 2012 Oceans, 1–7. doi: 10.1109/OCEANS.2012.6405081.
8. **Fjellstad O.E. and Fossen T.I.** Quaternion Feedback Regulation of Underwater Vehicles, Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Vol. 2, 1994, с. 857–862.
9. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем –СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
10. **Singla P., Mortari D. and Junkins J.** How to avoid singularity when using Euler angles? Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 119, 2005, с. 1409–1426.
11. **Gavrilina E. and Chestnov V.**, «Singularity-Free Attitude Control of the Unmanned Underwater Vehicle,» 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), IEEE, 2020, с. 512–519, doi: 10.1109/ICSTCC50638.2020.9259733.
12. **Лямина Е.А., Егоров С.А.** Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона. Инженерный журнал: наука и инновации, 2018, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1745>
13. **Desoer C. and Wang Y.T.** On the generalized Nyquist stability criterion. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 25, No. 2, 1980, с. 187–196.
14. **Fossen T.I.** Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2020.
15. **Костенко В.В., Михайлов Д.Н.** Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300». Подводные исследования и робототехника, 2012, № 1 (13), с. 36–46.
16. **Честнов В.Н.** Синтез многомерных систем по инженерным критериям качества на основе H_∞ -оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2019. № 10. С. 132–152.

Гаврилина Екатерина Андреевна – ассистент кафедры «Подводные роботы и аппараты»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Честнов Владимир Николаевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

vnchest@yandex.ru

Gavrilina Ekaterina Andreevna – assistant lecturer at the sub-department of «Underwater robots and vehicles» of Bauman Moscow State Technical University

ekaterina.a.gavrilina@gmail.com

Chestnov Vladimir Nicolaevich – D.Sc. of Engineering, leading research officer of ICS RAS

vnchest@yandex.ru
