

2.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Мешков В.Г.

Направления адаптации и идентификации в интегрированных автоматизированных системах управления..... 8

Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Седьмов А.Э.

Разработка параметрического цикла обработки деталей типа тела вращения со сложным профилем..... 13

Баранов Н.Е., Феофанов А.Н.

Построение автоматизированных систем управления производством с использованием методов адаптивного управления..... 22

Поляков С.Д., Быстрикова В.А. Применение комплексного метода квалиметрии при оценке цифровой зрелости предприятия..... 26

Филатов В.В., Чумаева М.В., Афонин К.С.

Постановка задачи построения модели цифрового управления исполнительным двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов 31

Шошина К.В., Васендина И.С., Паршин А.О., Алешко Р.А., Воронцов Р.А., Тюрбеева Т.Б.

Разработка методики автоматизированного определения заболоченности территорий Архангельской области на основе глубоких нейронных сетей 36

Тынченко В.С., Курашкин С.О.

Имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки в установившемся режиме для обработки технологического процесса 42

2.5.4. РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Подураев Ю.В., Стебулянин М.М., Климов Д.Д., Жохара А.

Алгоритм автоматизации смены режима движения экзоскелета для реабилитации нижних конечностей с использованием операционной системы ROS 47

Зеленский А.А.

Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем. Часть II. Методологии синтеза подсистем доверенной память-центрической системы управления движением 51

Илюхин Ю.В., Топорин А.А.

Обзор решений в области распределения задач между коллаборативным роботом и человеком 58

Берро Сомар М., Тимофеев А.Н.

Система реабилитации микромоторных возможностей человека. Моделирование и управление одиночной степени свободы 63

2.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Атрощенко В.В., Бердин В.К., Таймасова Л.А.

Влияние засаленности абразивного инструмента на качество поверхностного слоя и точностные параметры обрабатываемой детали 74

Балова Д.Г.

Эффективность применения и определение режущей способности твердосплавного инструмента при обработке титановых сплавов 82

2.5.6. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Адаскин А.М., Кубаткин В.С.

Повышение стойкости технологической оснастки для высокотемпературной термической обработки 87

Темпель Ю.А., Кокорин И.Н., Ергулович И.Н.

Перспективы развития нефтегазового машиностроения: новая конструкция плунжерного лифта 91

СОБЫТИЯ И ДАТЫ

Поздравление профессора В.И. Телешевского 98

Поздравление профессора Г.Д. Волковой 100

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» подвел итоги летних Всероссийских научно-технических олимпиад среди учащихся 102

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» приглашает к участию во Всероссийских конкурсах среди учащихся 105

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» приглашает к участию в Олимпиадах и Конференциях 107

VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 3 (62), 2022

CONTENTS

2.3.3. AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

Meshkov V.G.

Directions of adaptation and identification in integrated automated control systems 8

Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Sedmov A.E.

Development of a parametric cycle for processing rotation body type parts 13

Baranov N.E., Feofanov A.N.

CIM systems design based on adaptive control methods 22

Polyakov S.D., Bystrikova V.A.

Application of the complex method of qualimetry in assessing the digital maturity of an enterprise..... 26

Filatov V.V., Chumaeva M.V., Afonin K.S.

Statement of the problem of a digital control model constructing of a DC executive motor with excitation from permanent magnets..... 31

Shoshina K.V., Vasendina I.S., Parshin A.O., Aleshko R.A., Vorontsov R.A., Tyurbieva T.B.

Development of a methodology for the automated determination of the swampiness of the territories of the Arkhangelsk region based on deep neural networks..... 36

Tynchenko V.S., Kurashkin S.O.

Simulation modeling of the process of the electron-beam welding in steady state for testing the technological process 42

2.5.4. ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Poduraev Y.V., Stebulyanin M.M., Klimov D.D., Johara A.

Algorithm for automating the movement mode change of a lower limb rehabilitation exoskeleton using Robotic Operating System..... 47

Zelensky A.A.

Complex synthesis methodology of high-speed trusted industrial motion control systems of robots and mechatronic systems. Part II. Methodology of synthesis of subsystems of a trusted memory-centric motion control system..... 51

Ilyukhin Yu.V., Toporin A.A.

Review of solutions in the field of task allocation between a collaborative robot and a human..... 58

Berro S.M., Timofeev A.N.

Rehabilitation system of human micromotor capabilities. Modeling
and loop shaping of single-dof..... 63

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

Atroshenko V.V., Berdin V.K., Taymasova L.A.

The influence of contamination of the abrasive tool on the quality of the surface layer and the
accuracy parameters of the workpiece 74

Balova D.G.

Efficiency of application and determination of the cutting capacity of a carbide tool
in the processing of titanium alloys..... 83

2.5.6. TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

Adaskin A.M., Kubatkin V.S.

Increasing the lifetime of technological equipment for high-temperature heat treatment 87

Tempel Yu.A., Kokorin I.N., Ergulovich I.N.

Prospects for the development of oil and gas engineering: a new design of a plunger lift..... 91

EVENTS AND DATES

Congratulations to Professor V.I. Teleshevsky with the anniversary 98

Congratulations to Professor G.D. Volkova with the anniversary 100

MSUT «STANKIN» summed up the results of the summer All-Russian scientific
and technical Olympiads among students 102

MSUT «STANKIN» invites you to participate in All-Russian competitions among students 105

MSUT «STANKIN» invites you to participate in olympiads and conferences 107

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 519.685.7

В.Г. Мешков
V.G. Meshkov

НАПРАВЛЕНИЯ АДАПТАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

DIRECTIONS OF ADAPTATION AND IDENTIFICATION IN INTEGRATED AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

Рассмотрены средства и методы адаптации интегрированных автоматизированных систем управления (ИАСУ), процедуры идентификации объекта в классе дифференциальных уравнений. Описана реализация процедур системы адаптивной идентификации с использованием обобщенных фазовых координат.

The means and methods of adaptation of integrated automated control systems (IACS), object identification procedures in the class of differential equations are considered. The implementation of adaptive identification system procedures using generalized phase coordinates is described.

Ключевые слова: интегрированные автоматизированные системы управления, адаптация, идентификация, обобщенные фазовые изображения.

Keywords: integrated automated control systems, adaptation, identification, generalized phase images.

Введение

В настоящее время информационные технологии оказывают существенное влияние на развитие машиностроительной отрасли, позволяя решать комплексно вопросы автоматизации функций управления административно-хозяйственной, инженерно-технической, производственно-технологической и социальной деятельностью предприятий.

Как следствие, для многоуровневой структуры управления предприятием ввиду сложного характера взаимосвязей становится актуальной задача интеграции автоматизированных систем управления.

Выбор средств интеграции АСУ организационными и технологическими объектами должен обеспечивать их функциональную, информационную, техническую, программную и организационную совместимость.

При этом изменчивость и сложность характеристик объектов и внешней среды, а также рост требований к точностным и технико-экономическим характеристикам систем влечет необходимость применения принципов адаптации, которые позволяют начать процессы изменения параме-

тров, структуры систем или управляющих воздействий с целью достижения оптимального качества управления [1].

Адаптация в интегрированных автоматизированных системах управления

Выбор средств интеграции АСУ организационными и технологическими объектами должен обеспечивать их функциональную, информационную, программную, техническую и организационную совместимость. При этом технология системного управления должна обеспечить заданные технико-экономические показатели производственной деятельности и высокое качество продукции, учитывать итеративный характер процесса разработки ИАСУ.

В состав ИАСУ включаются средства и процедуры адаптации, обеспечивающие накопление, обработку данных, построение модели, перестройку структуры и регламента решения комплексов задач ИАСУ [2, 5].

В результате решения задач адаптации уточняются состав и структура комплекса задач ИАСУ, изменяется регламент их решения.

Цель функционирования ИАСУ понимается как оптимизация величины $J(\bar{c})$, которая задается в виде

$$J(\bar{c}) = \int_x Q(\bar{x}, \bar{c})P(\bar{x})d\bar{x} = M_{\bar{x}}\{Q(\bar{x}, \bar{c})\}, \quad (1)$$

где \bar{x} — вектор случайного процесса, отображающего значения конечных показателей ИАСУ с плотностью распределения $P(\bar{x})$, \bar{c} , — N -мерный вектор параметров, характеризующий состав и взаимосвязи элементов ИАСУ; $Q(\bar{x}, \bar{c})$ — заданная функция (например, функция эффективности ИАСУ); $M_{\bar{x}}$ — математическое ожидание.

Плотность распределения $P(\bar{x})$ полностью неизвестна, выборка \bar{x} увеличивается в процессе решения комплекса задач ИАСУ.

Требуется определить параметры (\bar{c}), соответствующие оптимуму $J(\bar{c})$.

Параметры \bar{c} определяются из условий

$$\begin{aligned} \nabla J(\bar{c}) &= M_{\bar{x}}\{\nabla_c Q(\bar{x}, \bar{c})\} = 0, \\ \nabla_c Q(\bar{x}, \bar{c}) &= \left(\frac{\delta Q(\bar{x}, \bar{c})}{\delta c_1}, \frac{\delta Q(\bar{x}, \bar{c})}{\delta c_2}, \dots, \frac{\delta Q(\bar{x}, \bar{c})}{\delta c_N} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\nabla_c Q(\bar{x}, \bar{c})$ — градиент случайного функционала $Q(\bar{x}, \bar{c})$ по \bar{c} .

Алгоритмы адаптации по наблюдаемым значениям \bar{x} , \bar{c} , $\nabla_c Q(\bar{x}, \bar{c})$ должны обеспечивать определение оценки вектора \bar{c} .

В задаче оценки параметров обычно заданы реализация случайного процесса $x(t)$ и критерий качества оценивания и требуется найти оценку характеристик процесса $x(t)$, таких как моменты распределения, квантили, плотность распределения и т.д.

Специфика адаптации интегрированных АСУ заключается в том, что при интеграции возникают дополнительные связи и ограничения, которые изменяются в результате решения задач адаптации.

Как при интеграции на одном уровне иерархической системы управления, так и в многоуровневой системе одной из основных является задача распределения функции адаптации между подсистемами. В многоуровневой системе распределение функций адаптации должно осуществляться координирующей системой на основе решения задач адаптации [3].

Для эффективной интеграции необходим обоснованный выбор структуры и состава элементов системы адаптивной идентификации (СИ), выбор алгоритмов СИ, которые обеспечивают построение моделей различных структуры и точности для различных компонентов ИАСУ.

Учитывая разнообразие элементов в составе ИАСУ, в основу построения СИ ИАСУ может быть положен подход к типовой идентификации, основанный на использовании метода фазовой плоскости, где исходный идентифицируемый процесс (например, переходная функция) исследуется в обобщенных фазовых координатах (ОФК) и представляется в виде некоторого нелинейного сочетания относительных производных от исходного процесса — обобщенных фазовых изображений (ОФИ). С учетом специфики ИАСУ СИ может быть представлена как беспойсковая адаптивная система управления идентификацией с эталоном — типовой моделью.

Методы идентификации детерминированных динамических объектов позволяют получить модель объекта в виде дифференциального уравнения лишь тогда, когда эталонную модель можно считать линейной по параметрам. Такое ограничение для большинства производственных звеньев или технологического процесса недопустимо, так как заведомо известно, что характер зависимости, например, функции выпуска продукции от ресурсов нелинеен.

Процесс построения и использования адаптивных моделей объектов включает получение исходных данных, построение и использование моделей при принятии управленческих решений.

Исходные данные должны обеспечить получение информации, необходимой для построения моделей различных классов и сложности. Чем грубее модель, тем меньше информации используется при обработке исходных данных, и наоборот. В зависимости от решаемых задач требуются модели разной точности. Поэтому важной является простота формирования модели различной сложности из одного и того же набора данных.

Идентификация объекта в классе дифференциальных уравнений

Процедуры использования моделей в ИАСУ в схемах принятия решений должны обеспечивать диагностику нарушений при оперативном планировании и регулировании производственных объектов, регулировании технологических процессов, управлении качеством продукции [4].

В целях многовариантного использования исходных данных для построения модели целесообразен выбор таких алгоритмов, которые обеспечивают построение сложных информативных моделей, например в классе стохастических дифференциальных уравнений с учетом суперпозиционных законов распределения случайных параметров, а также любых более простых моделей.

Тип дифференциального уравнения выбирается с учетом характера производственного объекта, что определяет выбор соответствующего ОФИ (табл. 1).

В случае, если отсутствует информация о типе эталонного дифференциального уравнения, которое соответствует идентифицируемому объекту, из возможных ОФИ выбираются такие, которые можно аппроксимировать более простой функцией при

одинаковой среднеквадратической погрешности. Для этого перед аппроксимацией осуществляется качественное сравнение графиков возможных ОФИ для каждой реализации $y(t)$ с целью выбора более простых ОФИ.

Таблица 1. Примеры дифференциальных уравнений, отображающих различные ОФИ

Вид ОФИ	Функция, аппроксимирующая ОФИ	Дифференциальное уравнение, адекватное ОФИ
$\delta(x)$	$\delta = a$	$\dot{x} - ax = 0$
$\chi(x)$	$\chi = a$	$\ddot{x} - ax = 0$
$\lambda(x)$	$\lambda = a$	$\ddot{x} - \frac{a}{x}\dot{x} = 0$
$\rho(x)$	$\rho = a$	$\ddot{x} - \frac{a}{x}\dot{x} = 0$
$\delta_\delta(x)$	$\delta_\delta = a$	$\ddot{x} - \frac{\dot{x}(\dot{x} + a)}{x} = 0$
$\delta(x)$	$\delta = k + c\chi$	$\ddot{x} - \frac{1}{c}\dot{x} + \frac{k}{c}x = 0$
$\delta(\lambda)$	$\delta = k + c\lambda$	$\ddot{x} - \frac{\dot{x}^2}{cx}(k - \frac{\dot{x}}{x}) = 0$
$\delta(\rho)$	$\delta = k + c\rho$	$\ddot{x} - \frac{\dot{x}}{cx}(k - \frac{\dot{x}}{x}) = 0$
$\delta(\delta_\delta)$	$\delta = k + c\delta_\delta$	$\ddot{x} - [(c + 1)\frac{\dot{x}}{x} - k] = 0$
$\chi(\lambda)$	$\chi = k + c\lambda$	$\ddot{x} - \frac{kx}{\dot{x}^2 - cx^2}x^2 = 0$
$\chi(\rho)$	$\chi = k + c\rho$	$\ddot{x} - \frac{kx}{\dot{x} - cx}x^2 = 0$
$\chi(\delta_\delta)$	$\chi = k + c\delta_\delta$	$\ddot{x} + \frac{c\dot{x} - kx}{\dot{x} - cx}\dot{x} = 0$
$\lambda(\rho)$	$\lambda = k + c\rho$	$\ddot{x} - \frac{k}{x - c\dot{x}}x^2 = 0$
$\lambda(\delta_\delta)$	$\lambda = k + c\delta_\delta$	$\ddot{x} - \frac{c\dot{x} - kx}{x(c\dot{x} - x)}x^2 = 0$
$\rho(\delta_\delta)$	$\rho = k + c\delta_\delta$	$\ddot{x} + \frac{c\dot{x} - kx}{x(1 - c)}\dot{x} = 0$

Если модель объекта ищется в классе линейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами при соблюдении равенств $\delta_y = c_\delta$ или $\chi_y = c_\chi$, или $\rho_y = c_\rho$, то результатами идентификации соответственно являются следующие соотношения:

$$y - c_\delta y = 0, \text{ или } \dot{y} - c_\chi y = 0, \text{ или } \ddot{y} - c_\rho y = 0. \quad (3)$$

Если модель объекта ищется в классе линейных дифференциальных уравнений 2-го порядка вида

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = 0, \quad (4)$$

то расчет коэффициентов a_1 и a_0 может быть осуществлен на основе соотношений

$$a_1 = \frac{\chi_y - \chi_{\dot{y}}}{\delta_{\delta_y}}, a_0 = \frac{\chi_{\ddot{y}} - \chi_y \sqrt{P_y}}{\delta_{\delta_y}}, \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\dot{y}\ddot{y} - y\ddot{\dot{y}}}{y\ddot{y} - \dot{y}^2}, a_0 = \frac{x\dot{y}\delta_y - x_y\rho_y - \ddot{y}\dot{y} - (\ddot{y})^2}{\delta_\delta y\dot{y} - (\dot{y})^2}.$$

Эти соотношения следуют из решения системы, в которую входят уравнение (4) и уравнение

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = 0, \quad (6)$$

Полученное в результате дифференцирования уравнения (4).

Если модель объекта ищется в классе линейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами, то аналогично (4) вместо постоянных c_δ , c_χ и c_ρ будут использованы функции времени, а формулы (5) видоизменятся следующим образом:

$$a_1(t) = \frac{\chi_y(t) - \chi_{\dot{y}}(t)}{\delta_{\delta_y}(t)}, \quad (7)$$

$$a_0(t) = \frac{\chi_{\ddot{y}}(t)\delta_y(t) - \chi_y(t)P_y(t)}{\delta_{\delta_y}(t)}.$$

Соотношения (7) получены путем решения системы уравнений

$$a_1(t) = \frac{\chi_y(t) - \chi_{\dot{y}}(t)}{\delta_{\delta_y}(t)}, \quad (8)$$

$$a_0(t) = \frac{\chi_{\ddot{y}}(t)\delta_y(t) - \chi_y(t)P_y(t)}{\delta_{\delta_y}(t)}.$$

при условии, что параметры $a_1(t)$ и $a_0(t)$ меняются существенно медленнее, чем сам процесс $y(t)$.

При этом соотношения $\dot{a}_0 y \ll a_0 \dot{y}$; $\dot{a}_1 \dot{y} \ll a_1 \ddot{y}$ очевидны для производственно-технологических систем и звеньев, где свойства объекта(процесса) изменяются медленнее функции выпуска.

Если модель объекта ищется в классе нелинейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами при соблюдении следующих соотношений:

$$\lambda_y(t) = a_\lambda, \delta_{\delta_y}(t) = a_{\delta_\delta}, \quad (9)$$

то результатом идентификации будут соответственно дифференциальные уравнения

$$y\ddot{y} - a_\lambda \dot{y} = 0 \text{ или } y\ddot{y} - \dot{y}(y - a_{\delta_\delta} y) = 0. \quad (10)$$

Если класс дифференциальных уравнений неизвестен, то идентификация объекта производится подстановкой в функцию, аппроксимирующую ОФИ, соотношений, соответствующих ОФК, входящих в данное ОФИ. Аналогичные процедуры получения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами можно применять и для идентификации объектов в классе стохастических дифференциальных уравнений по усредненной реализации $y(t)$.

Использование моделей технологических процессов

Контроль техпроцессов, который ведется по графической зависимости $y(t, a)$ заключается в сравнении $y(t)$ с графиками, отображающими различные состояния ТП. В целях упрощения алгоритма сравнения графических зависимостей они могут быть линеаризованы с помощью ОФК.

Если модель объекта (процесса) получена в классе дифференциальных уравнений, то ее можно использовать в ИАСУ при выработке управляющих воздействий с учетом динамических свойств управляемых объектов.

Обеспечение стабильности процесса в ИАСУ может быть осуществлено, в частности, на основе сопоставления \dot{y}_ϕ / y_ϕ с $\dot{y}_{пл} / y_{пл}$, где y_ϕ и $y_{пл}$ — соответственно фактическая и плановая функции выпуска.

Практическая реализация процедур системы адаптивной идентификации с использованием ОФК, в частности, иллюстрируется следующим образом.

1. Получение порождающего различные состояния объекта дифференциального уравнения $\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = 0$ для исходной зависимости $y(t) = (C_1 + C_2 t + C_3 t^2)e^{-at}$, отображающей, например, выпуск продукции при некоторых специальных условиях, заключается в нахождении коэффициентов

$$a_0 = A = \alpha^3; a_1 = \frac{A}{C} = 3\alpha^2; a_2 = \frac{A}{B} = 3\alpha$$

по изображению $y(t)$ в трехмерном пространстве с координатами $\frac{\dot{y}}{y}, \frac{\ddot{y}}{y}, \frac{\ddot{\dot{y}}}{y}$. Здесь A, B и C — отрезки, отсекаемые ОФИ зависимости $y(t)$ на осях этих координат.

2. Построение дифференциального уравнения $y\ddot{y} + \dot{y}^2 - 2y\dot{y}^2 = 0$, отображающего режимы выпуска продукции $\{b\}$ для производственного процесса $y(t) = (at + C)b$, заключается в нахождении ОФК вида

$$\lambda_y = \frac{y\dot{y}}{\dot{y}^2} = \frac{B-1}{B} \text{ и последующем дифференцировании по времени } \frac{d\lambda_y}{dt}$$

3. Нахождение дифференциального уравнения, инвариантного к параметру A исходной эмпирической зависимости $y = Ae^{b/x}$, характеризующей, например, вид разладки управляемого технологического процесса, обеспечивается выбором ОФК типа $y_1 = \lambda_{\delta_y}$, $x_1 = x$,

$$\text{где } \lambda_{\delta_y} = \frac{\delta_y \dot{\delta}}{\delta_y^2}$$

Линеаризованное изображение y инвариантно к A

и равно постоянному числу $\lambda_{\delta_y} = \frac{3b}{2}$.

4. Линеаризация и определение параметра σ_1 , логарифмически нормального закона распределения

$$W(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln x - a}{2\sigma^2}\right)^2} \text{ осуществляются в ОФК}$$

типа $y_1 = 1/(\delta_w + \delta_w x)$, где $\delta_w = \frac{\dot{w}}{w}$, $\delta_w = \frac{d\delta_w}{dx}$.

Эффективность процедур системы адаптивной идентификации обусловлена возможностью линеаризации исходных зависимостей, контрастирования отклонений в ОФК для определенных параметров, построения моделей, инвариантных к неконтролируемым параметрам, а также универсальностью ОФК и процедур построения на их основе моделей различных классов, в том числе класса дифференциальных уравнений, которые другими известными методами не могут быть получены. Эти результаты определяют целесообразность построения на основе процедур ОФК — ОФИ типовой, адаптивной системы идентификации, действующей при проектировании и функционировании различных классов моделей ИАСУ.

Мешков Валерий Геннадьевич — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mkt3@mail.ru

Meshkov Valeriy Gennadyevich — candidate Sc. of Engineering, docent, associate professor at the sub-department of «Automated information processing and management systems» of MSUT “STANKIN”
mkt3@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Феофанов А.Н., Баранов Н.Е. Обзор развития АСУ производством и типовые риски внедрения системы. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 3. С. 116–119.

2. Алпатов Д.А. Примеры реализации интегрированных систем управления // Международный студенческий научный вестник. — 2019. — № 6. С. 41–45.

3. Капитанов А.В. Особенности исследования самоорганизующихся адаптивных систем // Вестник МГТУ «Станкин» — 2016. — № 4(39). — С. 109–112.

4. Капитанов А.В., Попов А.П., Феофанов А.Н. Интегрированные производственные системы // Сварочное производство. — 2019. — № 7. — С. 53–56.

5. Егоров Ю.П., Пятаков А.И., Егоров Д.П. Обеспечение надежности интегрированных автоматизированных систем специального назначения на этапах проектирования. // Автоматизация процессов управления. — № 4 (50) 2017. — С. 5–13.

References

1. Feofanov A.N., Baranov N.E. Review of the development of automated control systems by production and typical risks of implementing the system. Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2019. No. 3. pp. 116–119.

2. Alpatov D.A. Examples of implementation of integrated control systems // International Student Scientific Bulletin. — 2019. — No. 6. pp. 41–45.

3. Kapitanov A.V. Features of the study of self-organizing adaptive systems // Vestnik MSTU Stankin. — 2016. — № 4(39). — pp. 109–112.

4. Kapitanov A.V., Popov A.P., Feofanov A.N. Integrated production systems // Welding production. — 2019. — No. 7. — pp. 53–56.

5. Egorov Yu.P., Pyatakov A.I., Egorov D.P. Ensuring the reliability of integrated automated systems for special purposes at the design stages. // Automation of management processes. — No. 4 (50) 2017. — pp. 5–13.

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЦИКЛА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ

DEVELOPMENT OF A PARAMETRIC CYCLE FOR PROCESSING ROTATION BODY TYPE PARTS

В статье рассматриваются особенности разработки параметрического цикла для обработки деталей типа тела вращения. Съем материала с поверхности детали осуществляется за несколько этапов. Контур конечной детали описывается пользователем на языке G-кода. Параметрический цикл, написанный на языке высокого уровня, принимает в качестве параметров пользователя информацию о контуре конечной детали, технологические особенности обработки. В случае невозможности выборки материала заготовки, часть контура автоматически исключается из обработки. Проведено тестирование разработанного цикла.

The article discusses the features of the development of a parametric cycle for processing parts such as a body of revolution. Removal of material from the surface of the part is carried out in several stages. The contour of the final part is described by the user in G-code language. The parametric cycle, written in a high-level language, takes as user parameters information about the contour of the final part, technological features of processing. If it is impossible to select the workpiece material, a part of the contour is automatically excluded from processing. The developed cycle was tested.

Ключевые слова: управляющая программа, параметрический цикл обработки, система ЧПУ, станок, язык высокого уровня.

Keywords: part-program, parametric cycle, CNC, machine-tool, high-level language.

Введение

Современные системы ЧПУ должны обеспечивать не только выполнение своих функциональных возможностей, но и предоставить пользователю максимальное число инструментов для удобной работы и интеграции системы ЧПУ в производственный процесс более высокого уровня [1–3].

Деталь типа тела вращения не всегда можно обработать за один проход режущего инструмента. Обычно обработка представляет собой, послойное снятие материала. Каждый проход резца приближает обрабатываемую заготовку к размерам детали. Программист вручную описывает перемещения инструмента с помощью G-кода, рассчитывает промежуточные координаты точек, учитывая припуск на чистовую обработку, что занимает большое количество времени. Для сокращения времени разработки управляющей программы, уменьшения числа возможных ошибок, упрощения тестирования (в общем случае в программе может быть описана не только обработка контура, но и последующая обработка проточек, обработка на торцевой поверхности цилиндра и т.д.) можно использовать параметрический цикл обработки сложного профиля детали типа тела вращения. В этом случае пользователь разбивает

весь контур на прямолинейные или круговые участки, вводит необходимые параметры обработки и вызывает цикл токарной обработки в основной управляющей программе. Расчет координат точек перемещения режущего инструмента реализуется внутри цикла. Одним из преимуществ цикла является описание контура для последующей обработки на языке G-кода и языка высокого уровня [4].

Схема работы цикла

Схема работы цикла представлена на рисунке 1. Пользователь, согласно чертежу, описывает контур детали для обработки на языке G-кода. При этом контур описывается как совокупность линейных и круговых элементов. Информация о контуре сохраняется в файле. Затем этот файл поступает в утилиту, которая преобразует описанный контур в массив данных, разбивая весь контур на элементарные участки — прямолинейные и круговые. В массиве будет содержаться информация о каждом элементе: начальная и конечная точка элемента, тип элемента — прямолинейный или круговой. Если элемент круговой, то дополнительно будет содержаться радиус окружности, направление перемещения — по или против часовой стрелке. Файл

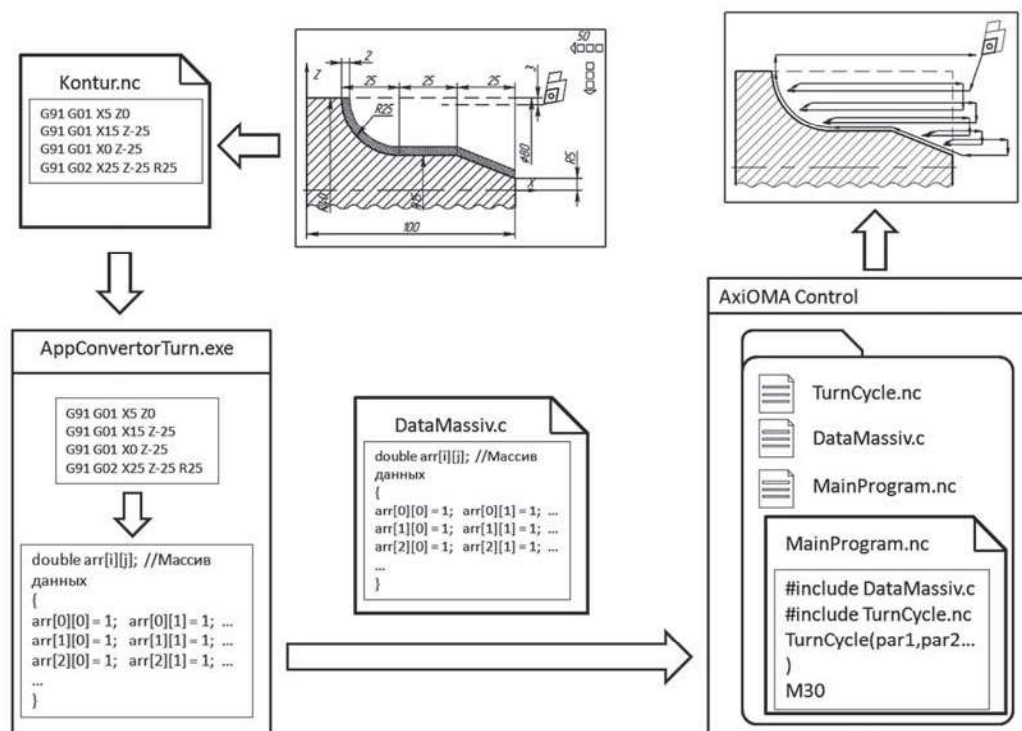


Рис. 1. Схема работы цикла обработки детали типа тела вращения

с описанием контура в виде массива элементов сохраняется и затем подключается в качестве подпрограммы к основной управляющей программе. Исходя из описания элементов в самом цикле рассчитываются необходимые величины перемещений по координатам z и x , необходимые для выборки слоя материала за указанное количество проходов в соответствии с конфигурацией контура детали.

Алгоритм работы цикла

Основная идея работы алгоритма заключается в том, что контур может быть разбит на элементы, при этом каждый элемент может принадлежать

к одному из трех типов: прямолинейный элемент, параллельный оси z , прямолинейный элемент, непараллельный оси z , круговой элемент. В цикле определяется, какой тип элемента является текущим и в зависимости от этого запускается на отработку соответствующая часть алгоритма. Отдельный интерес представляют элементы, которые не могут быть обработаны при последовательном съеме материала, такие как канавки, проточки и т.п. Эти элементы должны автоматически исключаться из обработки данным циклом и в дальнейшем дорабатываться с помощью специализированных циклов обработки этих элементов (рис. 2).

Алгоритм работы цикла представлен на рисунке 3.

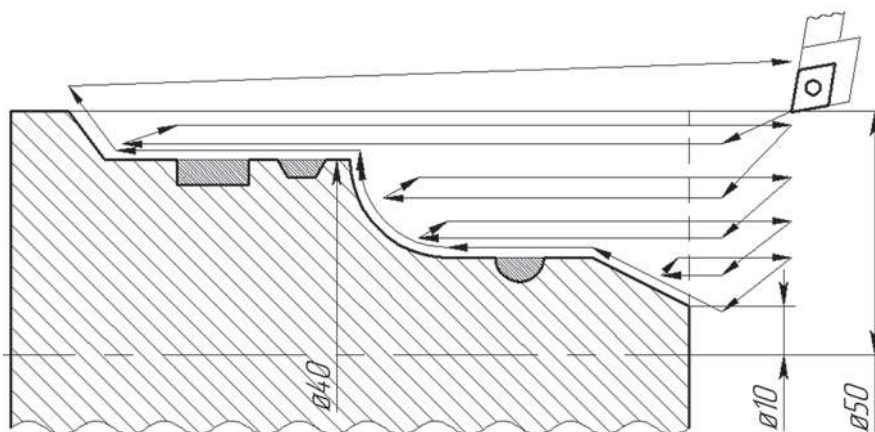


Рис. 2. Исключение элементов контура из обработки

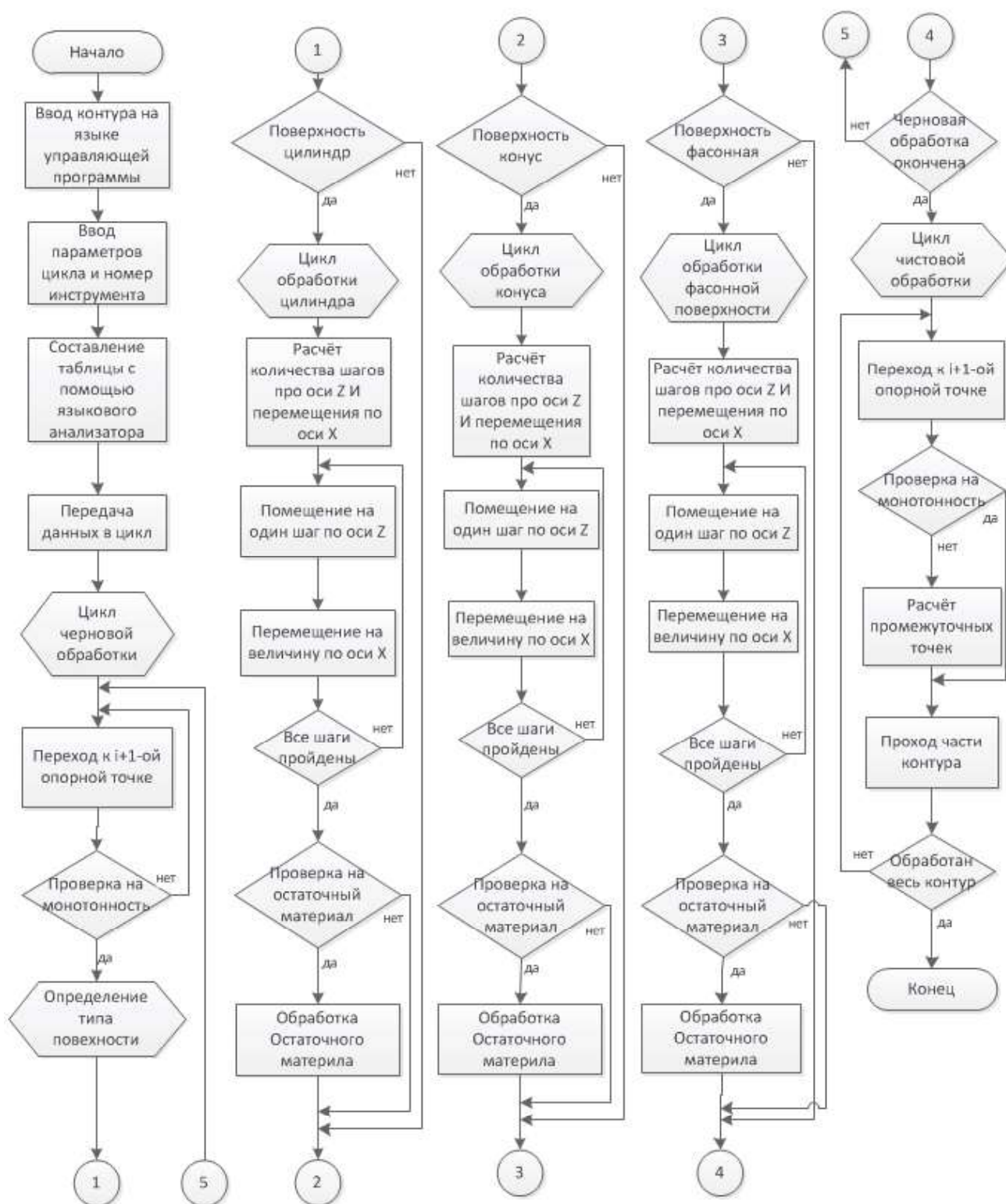


Рис. 3. Алгоритм работы цикла обработки детали типа тела вращения

В процессе работы цикла контур проверяется на монотонность. Если точка контура расположена на одном уровне или выше предыдущей опорной точки, то элемент отвечает требованию монотонно возрастающего контура и происходит обработка фасонной, конической или цилиндрической поверхности. Если ниже — следующий элемент не относится к монотонно возрастающему контуру. В этом случае проверяется каждый последующий элемент контура. Координата элемента контура, для которого координата точки по оси x будет больше или равна текущей координате, будет взята для определения конечной точки перемещения инструмента. Таким образом игнорируются канавки, проточки и т.п. Тип поверхности для обработки выбирается автоматически за счет данных, хранящихся в сгенерированном массиве.

Исходные данные цикла

Для расчета перемещений режущего инструмента в цикле необходимы данные параметров заготовки и конечной детали. Геометрические параметры заготовки представлены диаметром diameter и длиной length заготовки. Технологические параметры обработки включают в себя рабочую подачу для

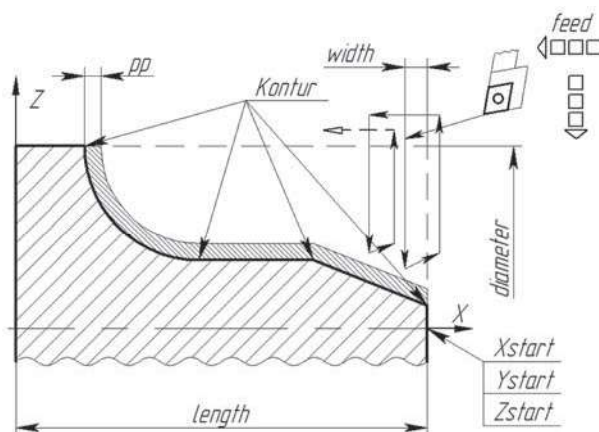


Рис. 4. Технологические параметры цикла обработки детали типа тела вращения

всех видов интерполяций feed, припуск на чистовую обработку pp и величину глубины врезания width (рис. 4).

Данные цикла, вводимые пользователем:

Kontur — массив данных геометрических параметров контура, подключается к циклу;
length, diameter — длина и диаметр заготовки, мм;

Длина заготовки	<input type="text" value="100"/>	мм
Диаметр заготовки	<input type="text" value="80"/>	мм
Врезание, X	<input type="text" value="2"/>	мм
Припуск на чист. обр.	<input type="text" value="0,5"/>	мм
Подача	<input type="text" value="50"/>	мм/мин
Стратегия	<input type="text" value="1"/>	
Нач. точка, X	<input type="text" value="0"/>	мм
Нач. точка, Y	<input type="text" value="0"/>	мм
Нач. точка, Z	<input type="text" value="0"/>	мм

Рис. 5. Интерфейс для ввода данных пользователем

width — глубина врезания, мм;

pp — припуск на чистовую обработку, мм;

feed — рабочая подача для всех видов интерполяции, мм/мин;

tactics — тактики обработки (вдоль оси z, перпендикулярно оси z, параллельно контуру)

Xstart, Ystart, Zstart — нулевая координата заготовки по оси x, y и z соответственно, мм.

Для удобства ввода данных пользователем необходим специальный интерфейс (рис. 5) [5, 6]. В зависимости от вводимого параметра пользователю выводится контекстная справка. Введенные данные автоматически собираются в строку вызова цикла с указанными параметрами [7, 8].

Программная реализация цикла

Структурно цикл обработки состоит из следующих частей: преобразование информации о контуре детали, обработка конической поверхности, обработка цилиндрической поверхности, обработка фасонной поверхности, пропуск канавок и проточек.

Пользователь описывает желаемый контур детали в отдельном файле на языке G-код. Затем данные этого файла считываются и преобразуются в массив (фрагмент кода показан на листинге 1), который сохраняется

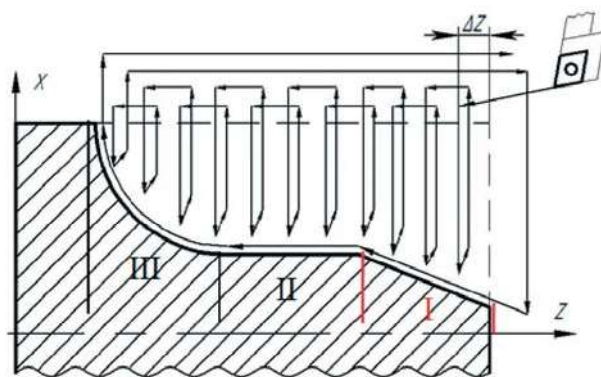


Рис. 6. Схема обработки поверхности детали типа тела вращения

в отдельном файле. Для удобства использования утилиты, обеспечивающая конвертацию данных встроена в систему ЧПУ «АксиОМА Контрол» [9, 10].

Далее в зависимости от полученных данных контура и введенных пользователем условий обработки рассчитывается количество и величины проходов, необходимых для обработки описанного контура. Весь контур детали можно разделить на отдельные элементы, которые будут представлять

Листинг 1. Преобразование данных контура в массив

```
std::ifstream file(name_contur);
for (int i = 0; i < 6; i++) //Открываем строку
{
file.getline(text, 50);
for (int j = 0; text[j] != '\0'; j++)//рассматриваем символ по
//очереди
{
if ((text[j] == 'G') || (text[j] == 'g'))
{
if ((text[j + 1] == '9') && (text[j + 2] == '1')) // G91
{
arr[i][0] = 1;
j = j + 2;
}
if ((text[j + 1] == '9') && (text[j + 2] == '0')) // G90
{
arr[i][0] = 2;
j = j + 2;
}
// ...
}
// ...
}
```

Листинг 2. Фрагмент программной реализации

```

if((line[jj][3]!=0)&(line[jj][2]!=0)) //Если И Z, И X НЕ равны 0
{
    step = floor(-line[jj][3]/width); //Количество шагов по оси Z
    step_X=((step*width)/(-line[jj][3]/line[jj][2]))/step;
    for(kk=ff; kk<step; kk++)
    {
        for(hh=0; hh<=jj-1; hh++)
        {
            level=level+line[hh][2];
        }
        G90 G00 X=0.6*diameter
        G91 G00 Z=-width;
        G91 G01 X=-0.1*diameter-(diameter/2-level-(kk+1)*step_X-
pp)
        G90 G00 X=0.6*diameter;
        level=0;
    }
}

```

из себя цилиндрические, конические или фасонные поверхности. В зависимости от типа поверхности (определяется по данным массива) будет подключаться та либо иная ветка алгоритма.

На рисунке 6 и листинге 2 показана реализация обработки конической поверхности.

Тестирование работы цикла

В рамках тестирования разработанного цикла были рассмотрены три различных детали типа тела вращения (рис. 7). Пример вызова цикла обработки поверхности детали показан в листинге 3.

В первых двух строчках описано подключение к основной управляющей программе непосредственно подпрограммы цикла обработки поверхности детали (TurnCycle.nc) и массива данных, содержащего информацию о контуре детали (TestDetalMassiv1.c). В начале управляющей программы описывается заготовка, выбирается инструмент и указываются технологические параметры обработки. Вызов цикла осуществляется следующим образом: пользователь в специальном интерфейсе (рис. 4) вводит параметры для обработки, строка вызова цикла автоматически создается после нажатия на кнопку «Принять».

Листинг 3. Пример вызова цикла обработки детали в основной управляющей программе

```

#include "TurnCycle.nc"
#include "TestDetalMassiv1.c"
G18 G90 G15 G191 G71 G72 G172 G272 G94 G97 G49 G40 G00 G80 G98
G53 G153 G193 G64 BRISKUT2DF // Строка безопасности (токарная
обработка)
#workpiece (1, 2, 256, 0, 80, 100, -40, -40, -100)
T7 M06
M03 G18 S1000 F1000
TurnCycle(100, 80, 4, 2, 0, 0, 0);
M30

```

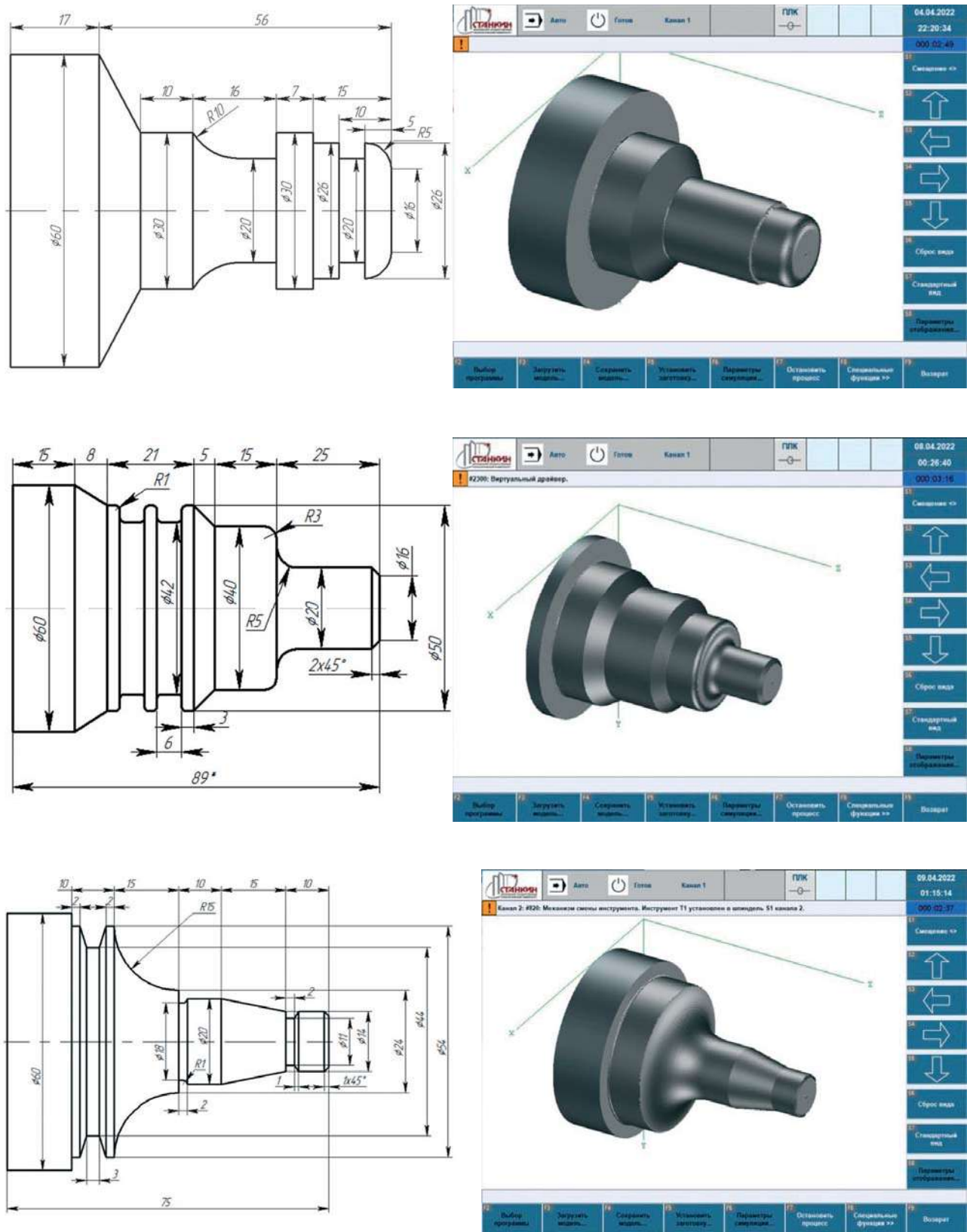


Рис. 7. Примеры использования цикла обработки деталей типа тела вращения

Выводы

Использование параметрического цикла обработки сложной поверхности детали типа тела вращения позволяет значительно упростить и ускорить разработку управляющих программ, сократить количество ошибок, тестирование, задачу конфигурирования параметров цикла при применении пользовательского интерфейса для ввода данных цикла. В цикле разработаны различные стратегии обработки контура, которые могут применяться в зависимости от типа детали (выбирается пользователем). Контур детали описывается при помощи G-кода.

Библиографический список

1. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Перспективы развития систем числового программного управления в концепции «Индустрия 4.0» // *Инновации*, № 8, 2016. с. 17–20.
2. Мартинова Л.И., Мартинов Г.М. Мировые тренды, возможности и перспективы развития систем ЧПУ станочного оборудования // *СТИН*, № 7. 2019. с. 28–31.
3. Nezhmetdinov R., Kovalev I., Chervonnova N., Nezhmetdinova R. and Al Khoury A. An approach to the development of logical control systems for technological equipment in the concept of Industry 4.0. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03044 (2020).
4. Пушков Р.Л., Саламатин Е.В., Евстафиева С.В. Практические аспекты применения языка высокого уровня в системе ЧПУ для реализации групповой обработки // *Автоматизация в промышленности*, № 5. 2018. с. 31–34
5. Евстафиева С.В., Захаров А.С., Козак Н.В. Конфигуратор интерфейса оператора для систем управления технологическим оборудованием // *Автоматизация в промышленности*, № 5. 2021. с. 19–23
6. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S., 2020. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03026. p. 1–6.
7. Мартинова Л.И., Фокин Н.Н. Подход к созданию унифицированной системы программирования токарно-фрезерных станков с ЧПУ в диалоговом режиме // *Автоматизация в промышленности*, № 5. 2019. с.14–17.
8. Martinov G.M., Martinova L.I. and Fokin N.N. Development of Toolkit for Formalizing the Programming of Canned Cycles on CNC Machine Tools. 2021. MATEC Web of Conferences 346(4):03098 DOI: 10.1051/matec-conf/202134603098
9. Мартинов Г.М. Система ЧПУ «АксиОМА Контроль»: перспективы развития в поле мировых трендов // *Вестник МГТУ «Станкин»*, № 1(44), 2018. с. 106–110.
10. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // *Вестник МГТУ «Станкин»*, № 1(24), 2014, с. 92–97.

References

1. Martinov G.M., Martinova L. I. Prospects for the development of numerical control systems in the concept of «Industry 4.0» // *Innovatsii*, No. 8, 2016. p. 17–20.
2. Martynova L.I., Martinov G.M. World trends, opportunities and prospects for the development of CNC machine equipment systems // *STIN*, No. 7. 2019. p. 28–31.
3. Nezhmetdinov R., Kovalev I., Chervonnova N., Nezhmetdinova R. and Al Khoury A. An approach to the development of logical control systems for technological equipment in the concept of Industry 4.0. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03044 (2020).
4. Pushkov R.L., Solomatin E.V., Evstafieva S.V. Practical aspects of using a high-level language in a CNC system for group processing implementation // *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, No. 5. 2018. p. 31–34
5. Evstafieva S.V., Zakharov A.S., Kozak N.V. Operator interface configurator for control systems of technological equipment // *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, No. 5. 2021. p. 19–23
6. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S., 2020. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03026. p. 1–6.
7. Martynova L.I., Fokin N.N. Approach to the creation of a unified programming system for CNC turning and milling machines in an interactive mode // *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, No. 5. 2019. p. 14–17.
8. Martinov G.M., Martinova L.I. and Fokin N.N. Development of Toolkit for Formalizing the Programming of Canned Cycles on CNC Machine Tools. 2021. MATEC Web of Conferences 346(4):03098 DOI: 10.1051/matecconf/202134603098

9. Martinov G.M. The CNC system «AxiOMA Control»: prospects of development in the field of world trends // Vestnik MSUT «Stankin», No. 1(44), 2018. p. 106–110.

10. Martinov G.M., Martynova L.I. Formation of a basic CNC computing platform for the construction of specialized control systems // Vestnik MSUT «Stankin», № 1(24), 2014, p. 92–97.

Пушков Роман Львович — канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

pushkov@ncsystems.ru

Евстафьева Светлана Владимировна — старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

svetlana.evstafieva@gmail.com

Седьмов Андрей Эдуардович — магистрант кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

sedmov.diary@mail.ru

Pushkov Roman Lvovich — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems” of MSUT “STANKIN”

pushkov@ncsystems.ru

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

svetlana.evstafieva@gmail.com

Sedmov Andrej Eduardovich — master degree student at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems” of MSUT “STANKIN”

sedmov.diary@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

CIM SYSTEMS DESIGN BASED ON ADAPTIVE CONTROL METHODS

Рассматривается подход к построению автоматизированных систем управления производством на базе методов адаптивного управления.

Approach to Computer Integrated Manufacturing System design based on adaptive control methods is described.

Ключевые слова: автоматизированная система управления производством, оптимальный адаптивный регулятор

Keywords: Computer Integrated Manufacturing System, optimal adaptive regulator

В условиях быстро меняющейся внешней среды, а также влияния динамики внутренних факторов предприятия, задача адаптации автоматизированных систем управления производством (АСУП) приобретает особую актуальность [1].

Процессы, протекающие в машиностроительном производстве, подразумевают взаимодействие элементов, при котором изменяется состояние предмета производства в процессе изготовления изделия. Таким образом, современная производственная система представляет собой совокупность сложных динамических подсистем, выступающих в качестве объектов управления.

Процесс управления осуществляется комплексом устройств, призванных оперативно реагировать на изменение производственной ситуации и вырабатывать соответствующие воздействия на ее элементы, исходя из условий необходимости ликвидации рассогласования между состоянием управляемого объекта и его желаемым состоянием, ограничением времени и ресурсов, необходимых на приведение объекта управления в заданное состояние.

Для реализации указанной задачи необходимо разработать комплекс соответствующих математических моделей и методик [2].

Математическое моделирование, основывающееся на актуальной информации о реальных технологических процессах и работе реальных объектов, нашло сегодня широкое применение в различных областях науки и техники [2].

Однако построение адекватной математической модели для управляющей системы невозможно без привлечения экспериментальных данных из-за большого разнообразия возмущающих воздействий, изменяющихся в процессе работы. Например, математическая модель процесса механообработки

должна учитывать не только динамические (силовые) факторы, но и упругие и пластические деформации в зоне резания, вибрации, влияние тепловых факторов, износ инструмента, стружкообразование, настройку оборудования на размер [3]. Компенсировать случайные изменения технологических параметров, например, колебания припуска и локальные изменения свойств материалов, в частности, дает возможность применение методов адаптивного управления, позволяющих формировать управляющие воздействия при изменении параметров объекта управления и условий его функционирования [4]. Примером может служить использование адаптивного регулятора при управлении движением рабочего органа технологического робота по требуемой траектории [5].

В современных системах управления вид и параметры регуляторов автоматически модифицируются в зависимости от цели конкретного движения и условий, в которых они фактически осуществляются. Настройки регуляторов определяются либо набором алгоритмов и правил, сформулированным разработчиком на базе имеющегося опыта, либо на основании знаний, накопленных самой машиной в процессе анализа ее предшествующих действий [6].

Рассмотрим подход, основанный на использовании алгоритма управления на базе оптимального адаптивного регулятора с полиномиальным приближением выходных параметров [7] в различных модификациях.

Скалярный оптимальный адаптивный регулятор. Рассматривается задача конструирования оптимального регулятора для скалярного процесса $x = x(t, u)$, где t — время, u — управляющее воздействие (управление). Процесс x представляет собой рассогласование между заданной и выходной величиной регулируемого объекта. Данный процесс является

сложным нелинейным, подверженным возмущениям, построение его адекватной математической модели вызывает значительные трудности.

В качестве критерия оптимальности для решения задачи конструирования оптимального регулятора выбираем функционал обобщенной работы (ФОР), поскольку в данном случае существенно упрощается нахождение оптимального управления [8]:

$$I = \frac{1}{2}V_3(t_y) + \frac{1}{2} \int_0^{t_y} Q(t)dt + \frac{1}{2} \int_0^{t_y} \frac{u^2 + u_{\text{он}}^2}{k} dt,$$

$$V_3(t_y) = \alpha_1 x^2(t_y) + \alpha_2 \dot{x}^2(t_y),$$

$$Q(t) = \beta_1 x^2(t) + \beta_2 \dot{x}^2(t),$$
(1)

здесь $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$, k, α_i, β_i — заданные положительные коэффициенты, t_y — цикл управления.

Наиболее универсальным алгоритмом оптимизации по ФОР является алгоритм с прогнозирующей моделью [8]. Его суть состоит не в точном решении двухточечной краевой задачи, возникающей при минимизации критерия (1) при условии описания регулируемого процесса в виде $\dot{x} = f(t, x, u)$, а в определении граничных условий в момент времени t_y с помощью прогнозирующей модели вида $\dot{x}_m = f(t, x, u)|_{u=0}$.

Исследуемый скалярный процесс x даже при его стохастичности с ограниченным спектром можно аппроксимировать на коротком промежутке времени полиномом степени N : $x(t) = \sum_{i=0}^N a_i t^i$. Это эквивалентно описанию скалярного процесса системой линейных дифференциальных уравнений порядка $N + 1$:

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & E_N \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = (0, \dots, 0, 1)^T,$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_{N+1})^T.$$
(2)

Здесь x — вектор, содержащий полиномиальное приближение процесса и его производные, $x_k(0) = a_{k-1} \cdot k!$, $k = \overline{1, N}$; u — скалярное управление, равное нулю для прогнозирующей модели; E_N — единичная матрица порядка N .

С учетом (2) терминальная и интегральная части ФОР (1) примут вид:

$$V_3(t_y) = \alpha_1 x_1^2(t_y) + \alpha_2 x_2^2(t_y),$$

$$Q(t) = \beta_1 x_1^2(t) + \beta_2 x_2^2(t),$$
(3)

Модель регулируемого процесса в виде полинома (т.е. в виде линейной системы (2)), строится с помощью методов регрессионного анализа в течение оче-

реднего цикла работы регулируемого объекта по результатам измерения выходной величины. Полученная полиномиальная модель используется в качестве прогнозирующей для определения оптимального управления на следующем цикле работы.

Многомерный оптимальный адаптивный регулятор. Алгоритм построения адаптивного регулятора для объекта, имеющего M входов и N выходов, тот же самый. По результатам измерения сигнала на каждом выходе строится полиномиальная модель. В качестве вектора состояния многомерного объекта рассматривается вектор, компонентами которого служат подвекторы, характеризующие полиномиальное приближение измеряемого на каждом выходе процесса. Тогда математическая модель примет вид

$$\dot{X} = AX + Bu,$$

$$X^T = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_N^T], u^T = [u_1, u_2, \dots, u_M],$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_N \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix},$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kM} \end{bmatrix},$$

где вектор X_i , матрицы A_i, B_i имеют размерности, определяемые по результатам измерения выходной величины на i -ом выходе.

В качестве критерия оптимальности для конструирования оптимального регулятора также возьмем ФОР

$$I = \frac{1}{2} X^T Q_0 X \Big|_{t=t_y} +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{t_y} [X^T Q_1 X + u^T K^{-1} u + u_{\text{он}}^T K^{-1} u_{\text{он}}] dt,$$
(4)

где Q_0, Q_1 — неотрицательно определенные матрицы, а K — положительно определенная.

Когда ФОР (4) представляет собой сумму ФОР, рассматривавшихся для скалярного случая, записанных для каждого входа, матрицы имеют вид

$$Q_0 = \text{diag}(\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^N),$$

$$Q_1 = \text{diag}(\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N),$$

$$\alpha^k = \text{diag}(\alpha_1^k, \alpha_2^k, 0, \dots, 0),$$

$$\beta^k = \text{diag}(\beta_1^k, \beta_2^k, 0, \dots, 0),$$

$$K = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_M).$$

Полагая матрицу K единичной, получим управление для многомерного объекта в виде взвешенной суммы управлений, вырабатываемых скалярными регуляторами, установленными на каждом входе.

Использование оптимального адаптивного регулятора данного типа может позволить построить систему управления по принципу «черного ящика» при недостатке знаний о физике объекта управления.

Следует отметить, что представленный подход не рассматривает иерархическую структуру управления промышленным предприятием.

Особенностью такой структуры является сочетание централизованного управления системой с локальным управлением отдельными объектами. Функции управления разделены между верхним уровнем управления, который реализует алгоритм глобального управления системой, и нижними уровнями, каждый из которых решает задачи управления определенным подмножеством объектов в соответствии с управляющими действиями верхнего уровня [9].

Основная схема формирования иерархии управленческих задач следующая: решение задачи верхнего уровня определяет цели для задач нижнего уровня и приводит к осуществлению информационных операций, в том числе финансовых. Управляющие решения, непосредственно связанные с изменениями в процессе производства, то есть установление последовательности операций и их интенсивности, относятся к низшему уровню.

Решение проблемы каждого уровня требует получения новой информации о состоянии системы к моменту начала разработки соответствующего решения. Иерархия системы задач управления в определенной степени определяет иерархическую структуру информационно-управляющей системы. Решение проблем более высокого уровня, как правило, относится к функциям более высоких уровней в организационной структуре.

Иерархические системы управления могут отличаться друг от друга комбинацией связей между подсистемами и составом подсистем в зависимости от их поведения. Функционирование системы рассматривается применительно к назначению подсистемы верхнего уровня. Функционирование подсистем каждого уровня структурировано таким образом, чтобы удовлетворять целям подсистем верхнего уровня по отношению к ним. Каждая из подсистем при решении задач самоуправления определяет свои возможности на плановый период, используя более достоверную информацию. С учетом этих возможностей решается задача согласования подсистем нижнего уровня для выполнения задачи подсистемы верхнего уровня. Если решение такой проблемы невозможно, то между двумя соседними уровнями возникает конфликтная ситуация, которая приводит к решению задачи перепланирования в подсистеме верхнего уровня, то есть к перераспределению ресурсов или изменению значений управляющих воздействия. Если эта проблема разрешима, то управляющее воздействие выдается на подсистемы нижнего уровня, которые решают свои проблемы и т. д.

Управляющие воздействия в каждой из подсистем позволяют решить задачу подсистемы верхнего уровня. Таким образом, будут определены эталонные значения выходных переменных каждой из подсистем, относительно которых должна решаться задача оперативного управления при воздействии внешних возмущений на подсистемы нижних уровней. В этом случае необходимо рассмотреть вопросы точности функционирования исследуемой иерархической системы.

Для эффективного решения задачи многокритериальной оптимизации в первую очередь необходимо построить адекватную математическую модель, с помощью которой которую затем нужно оптимизировать управление на каждом из уровней, предварительно выбрав для этого наиболее подходящий метод.

Библиографический список

1. Баранов Н.Е., Феофанов А.Н. Управление изменениями в АСУ производством: проблематика исследований // *Технология машиностроения*. 2019. № 2. С. 65–71.
2. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бочкарев П.Ю., Схиртладзе А.Г. Управление станками и станочными комплексами. — Старый Оскол: ТНТ, 2014. — 352 с.
3. Митрофанов В.Г., Капитанов А.В., Кравцов А.Н., Искра Д.Е. Моделирование и управление движениями формообразования при механической обработке / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева — Ирбит: ОНИКС, 2011. — 239 с.
4. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000 — 80 с.
5. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. — 448 с.
6. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.
7. Баранов Н.Е., Феофанов А.Н. Автоматизация управления бизнес-процессами при их неизвестном математическом описании // *Наука сегодня: вызовы и перспективы развития*. Материалы международной научно-практической конференции. 2016. — Вологда: ООО «Маркер», 2016. С. 8–10.
8. Красовский А.А. Развитие принципа минимума обобщенной работы // *Автоматика и телемеханика*. 1987. № 1. С.13–23.
9. Feofanov A., Baranov N. Multiobjective optimization in ERP system design // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020)*. MATEC Web Conf. 329 03042 (2020). DOI: 10.1051/matecconf/202032903042

References

1. Baranov N.E., Feofanov A.N. CIM changing management: research subject matter *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2019. vol. 2, pp. 65–71.
2. Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Bochkarev P.Yu., Shirladze A.G. Control of machine tools and machine-tool sets. Stariy Oskol: TNT, 2014. — 352 p.
3. Mitrofanov V.G., Kapitanov A.V., Kravtsov A.N., Iskra D.E. Modeling and motion control of morphogenesis in the machining / Ed. Solomentsev Yu.M. Irbit: ONIKS, 2011. — 239 p.
4. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptive control of dynamic objects. — M.: Nauka, Main editorial board of physical and mathematical literature, 1980. — 448 p.
5. Poduraev Yu.V. Basis of mechatronics. M.: MSUT “STANKIN”, 2000. — 80 p.
6. Andrievskiy B.R., Fradkov A.L. Selected chapters of automatic control theory with examples on MATLAB. Spb.: Nauka, 2000. — 475 p.
7. Baranov N.E., Feofanov A.N. Control automation of business process under their unknown mathematical formulation. *International theoretical and practical conference “Science today: challenges and progress prospects”*. 2016. — Vologda: OOO «Marker», 2016. pp. 8–10.
8. Krasovskiy A.A. Extending the principle of maximal generalized work. *Avtomatika i telemekhanika*, 1987, vol. 1, pp. 13–23.
9. Feofanov A., Baranov N. Multiobjective optimization in ERP system design. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020)*. MATEC WebConf. 329 03042 (2020). DOI: 10.1051/mateconf/202032903042

Баранов Николай Евгеньевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой № 14 Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации

nbaranov@yandex.ru

Феофанов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

feofanov.fan1@yandex.ru

Baranov Nikolay Evgenievich — candidate Sc. of Engineering, docent, head of the department № 14, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation

nbaranov@yandex.ru

Feofanov Alexander Nikolaevich — D. Sc. of Engineering, Full professor, professor at the sub-department of “Engineering graphics” of MSUT “STANKIN”

feofanov.fan1@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА КВАЛИМЕТРИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

APPLICATION OF THE COMPLEX METHOD OF QUALIMETRY IN ASSESSING THE DIGITAL MATURITY OF AN ENTERPRISE

Приведен анализ систем диагностики и оценки уровня зрелости промышленного предприятия. Предложен гибкий подход к оценке уровня цифрового развития предприятия путем адаптации модели зрелости организационного управления проектами (ОПМЗ) на основе применения комплексного метода квалиметрии, методов экспертной оценки и линейной нормализации с учетом значимости каждого направления (сегмента) развития цифрового предприятия.

The analysis of diagnostic systems and assessment of the maturity level of an industrial enterprise is given. A flexible approach to assessing the level of digital development of an enterprise is proposed by adapting the Maturity Model of organizational project management (OPM3) based on the use of a comprehensive method of qualimetry, expert assessment methods and linear normalization, taking into account the significance of each direction (segment) of the development of a digital enterprise.

Ключевые слова: цифровое предприятие, уровень зрелости, модель оценки, метод квалиметрии.

Keywords: digital enterprise, maturity level, assessment model, qualimetry method.

Интенсивное развитие средств информатизации и систем информационной поддержки жизненного цикла изделий предполагает поэтапное внедрение новых цифровых технологий и их компонентов в инфраструктуру и производственную среду современного предприятия. Новая цифровая среда организации призвана обеспечить высокую производительность труда сотрудников предприятия, существенное повышение качества особенно технически сложных изделий, общее снижение стоимости их жизненного цикла и повышение конкурентоспособности продукции на российском и зарубежном рынках.

Успешное применение цифровых компонентов на предприятии предполагает существенный его задел в области внедрения в организации систем автоматизированного проектирования, управления производством, промышленной автоматизации, систем информационной поддержки всех этапов жизненного цикла изделий, включая: системы управления данными об изделии, ресурсами организации, взаимодействия с потребителями и поставщиками комплектующих и материалов, системы интегрированной логистической поддержки, включая комплекс систем поддержки потребителей на этапе технической эксплуатации изделий, материально-технического снабжения и ремонта изделий.

В связи с изложенным можно говорить о развитии предприятия в комплексном контексте применения традиционных и современных систем управления

жизненным циклом изделий и новых цифровых технологий. В историческом контексте для конкретной организации указанные технологии имеют разную степень внедрения и интеграции. Для различных заинтересованных сторон может потребоваться комплекс необходимых процедур диагностики цифровой зрелости предприятия.

Из известных систем оценки развития предприятия можно выделить [1]:

- модель зрелости организационного управления проектами (ОПМЗ) американского Института управления проектами (PMI);
- методологию оценки зрелости компании в использовании технологий информационного моделирования зданий (BIM, Великобритания);
- методологию оценки зрелости компании в использовании технологий бережливого производства (GBM — глобальный сравнительный анализ, применяемый компанией Toyota Engineering Corporation).

Специалисты Московской школы управления «Сколково» в своем рабочем докладе корпоративного обучения свой выбор делают на методологии оценки зрелости компании в управлении проектами ОПМЗ [1].

Эталонная Модель ОПМЗ (рис. 1) [1] включает следующие компоненты: 5 уровней зрелости производительности предприятия (**Ad hoc** — случайный, **Defined** — базовый, **Managed** — управляемый, **Integrated** — интегрируемый, **Optimized** — оптимизи-

зируемый) и 15 ключевых компонентов (сегментов) современного производства [1]: единое информационное пространство предприятия (EIM); цифровое моделирование и оптимизация процессов и продуктов компании (DM); конвергенция цифрового и физического в разрабатываемом продукте (DT); корпоративная инновационная система и акселератор (CA); систематизация, накопление и защита нематериальных активов (HMA) и интеллектуальной собственности (IAS); цифровой реверс-инжиниринг (DRE); аддитивное производство (AM); энергоэффективность производственных пред-

приятий (EE); выход подсистем системы управления информацией предприятий (PDM, MES, MDC) на автоматизированные рабочие места (APM) производственных участков (CAM); производственная система с работающими технологиями бережливого производства (L); цифровое управление логистикой (DL); трансфер технологий (TT); кросс-отраслевая кооперация (CIC); партнерство с образовательными платформами (EDU); профессиональное управление проектами (PM).

Применение модели основано на сопоставительном анализе на основе эталонных показателей (бенчмаркинге) цифрового развития предприятия. Указанный подход можно рассматривать как дифференциальный метод количественной оценки качества продукции (квалиметрии) [2]. Дифференциальный метод хорошо работает при сопоставительной оценке двух или нескольких аналогичных объектов исследования по ограниченному числу исследуемых свойств, например, двух аналогичных производств по эталонной шкале, представленной в виде циклограммы (рис. 2) [1].

Однако модель требует существенной доработки при оценке соответствия потребностям различных заинтересованных сторон, в том числе конкретным заказчикам или потенциальным потребителям. Модель потребует определенной адаптации при оценке соответствия требованиям нормативных документов, если такие требования будут разработаны и установлены, или потребуются учет специфики продукции конкретных производств или производственных объединений.

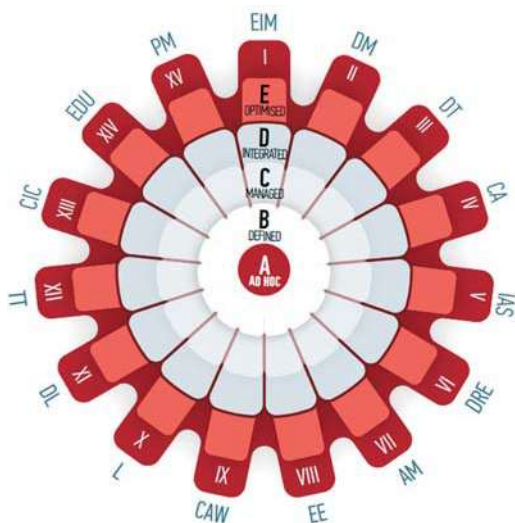


Рис. 1. Эталонная модель OPM3



Рис. 2. Циклограмма сравнения двух аналогичных производств по эталонной шкале

Иначе говоря, в общем случае, могут применяться не все ключевые компоненты (сегменты) производства или их максимальные значения. Максимальные значения уровней развития предприятия могут быть ограничены их допустимыми значениями. Причем эти значения могут быть не только целыми, но и дробными числами. Комплексное сравнение различных производств, а также их специфика по отношению к сегментам развития могут потребовать обобщенной оценки цифрового развития предприятия с учетом значимости каждого сегмента его развития.

Подход к адаптации и доработке эталонной модели возможен на основе применения не только дифференциального, но и комплексного метода квалиметрии [3], а также известных методов экспертной оценки и получения нормализованных значений свойств объекта [4].

При применении указанного подхода эталонную модель ОРМз целесообразно представить в виде столбчатой диаграммы, где по оси абсцисс расположены сегменты развития цифрового предприятия, а по оси ординат уровни его цифрового развития (рис 3, где

P_i — значение уровня развития предприятия, i — номер сегмента его развития). Адаптация модели может быть осуществлена с учетом значимости каждого сегмента развития цифрового предприятия на базе применения, например, таких методов экспертной оценки, как метод экспертного ранжирования, метод непосредственной оценки или метод парных сравнений [4]. В результате применения этих методов определяется комплект весовых коэффициентов, каждый из которых поставлен в соответствие определенному сегменту развития предприятия. Сегменты, получившие весовые коэффициенты предельно малых значений, могут быть исключены из эталонной модели. Допустимые значения уровней развития могут устанавливаться в нормативных документах в зависимости от конкретных целевых потребностей оценки или с использованием пропорциональных значений уровней значимости (весовых коэффициентов) сегментов развития предприятия. Пример адаптированной модели оценки развития предприятия представлена на рисунке 4, где $P_{i\text{доп}}$ — значение уровня развития предприятия, i — номер сегмента его развития.

Уровни развития предприятия



Рис. 3. Эталонная модель оценки развития предприятия

Уровни развития предприятия

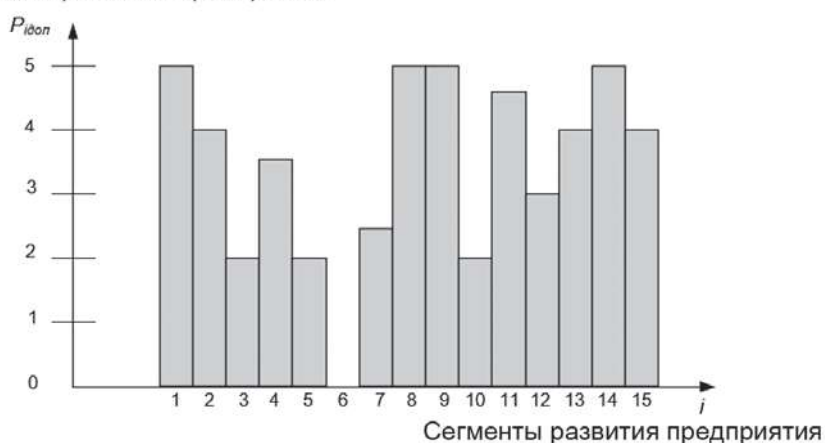


Рис. 4. Пример адаптированной модели оценки развития предприятия

Таблица 1. Шкала и критерии оценки второго направления развития предприятия

Уровень развития	Целевые критерии принятия решений	Шкала оценки
Ad hoc	Наличие блок-схемы, определяющей бизнес-процессы предприятия	1
Defined	Присутствуют функциональные модели потоков работ и данных	2
Managed	Обеспечено взаимодействие с организацией, уже имеющей положительные результаты оценки процессов по созданной обобщенной цифровой модели	3
Integrated	Возможность адаптации производства и стратегии предприятия на основе стандартных процессов и моделей производства	4
Optimized	Наличие цифрового двойника организации, цифровой модели совершенствования бизнес-процессов и прототипирования технологических процессов предприятия.	5

Диагностика уровня развития предприятия может быть осуществлена квалифицированными специалистами или экспертами на основе сбора необходимых данных при мониторинге предприятия по направлениям (сегментам) его развития. Вся информация для формирования шкалы оценки уровня развития предприятия по соответствующим сегментам приведена в докладе «Сколково» [1]. Например, по второму направлению развития предприятия «Цифровое моделирование бизнес-процессов и технологических процессов компании» шкалы оценки и целевых критериев принятия решений представлены в таблице 1.

Достижение критериев по уровню 2 невозможно без достижения требований по уровню 1, а достижение критериев по уровню 3 невозможно без достижения требований по уровню 1 и 2 и т.д. до уровня 5. Пример оценочной диаграммы развития предприятия представлен на рисунке 5, где $P_{iоц}$ — оцениваемое значение сегмента.

Для корректного определения обобщенного значения уровня развития предприятия существующая шкала оценки должна быть приведена к единой безразмерной шкале, такой процесс известен под названием нормализация (нормирование). Наиболее пред-

почтительной является линейная нормализация [4], позволяющая привести значения свойств объектов к единой безразмерной шкале и диапазону от нуля до единицы.

Для решения задачи линейной нормализации определяется вектор оцененных значений уровней развития предприятия P_i . Нормализованные значения уровней b_i зависят от величины интервала $[P_{i\min}; P_{i\max}]$ и могут быть определены по формуле 1 с учетом максимизации рассматриваемых значений.

$$b_i = \frac{P_i - P_{i\min}}{P_{i\max} - P_{i\min}} \quad (1)$$

Поскольку $P_i = P_{iоц}$, $P_{i\min} = 0$ для минимального значения оценки, а $P_{i\max} = P_{iдон}$ — допустимое значение для адаптированной модели оценки развития предприятия, то нормализованные значения могут быть определены следующим образом:

При $P_{iоц} < P_{iдон}$ нормализованное значение будет вычисляться по формуле 2.

$$b_i = \frac{P_{iоц}}{P_{iдон}} \quad (2)$$

Уровни развития предприятия

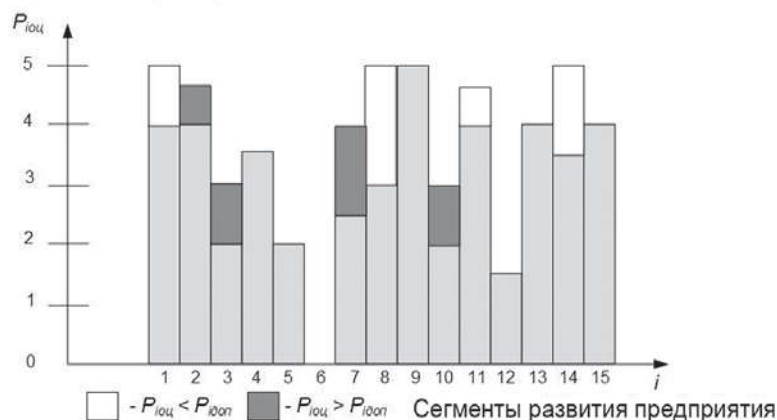


Рис. 5. Диаграмма оценки развития предприятия

При $P_{iout} \geq P_{idon}$ нормализованное значение должно быть $P_{iout} = P_{idon}$, а $b_i = 1$

Выполнение последнего условия необходимо для исключения взаимного влияния оцениваемых уровней сегментов друг на друга при обобщенной оценке уровня развития предприятия.

$$K_i = b_i = \frac{P_i}{P_{idon}} \quad (3)$$

Поскольку в формуле 2 для вычисления b_i имеется оцененное и нормативно установленное значение, то в соответствии с положениями квалиметрии [2] и стандартизованным определением качества [5] нормализованное значение b_i является оценкой K_i уровня развития предприятия по соответствующему направлению (формула 3).

Обобщенный уровень цифрового развития предприятия K_0 может быть определен с использованием средневзвешенной арифметической оценки комплексного метода квалиметрии по формуле 4,

$$K_0 = \sum_{i=1}^n K_i \omega_i \quad (4)$$

где K_i — оценка i -го сегмента (направления) развития предприятия, ω — весовой коэффициент i -го сегмента развития предприятия.

Предложенный подход на основе комплексного метода квалиметрии к оценке уровня цифрового развития предприятия обладает большей оценочной гибкостью по сравнению с эталонной моделью ОРМ₃, поскольку предполагает наличие допустимых значений оцениваемых уровней по каждому сегменту и обобщенного уровня развития предприятия. Допустимые значения уровней развития обеспечивают возможность установления предпочтительных

целевых показателей для различных категорий потребителей результатов оценки. В качестве такого потребителя может быть само предприятие (одна сторона), желающее установить планируемый уровень целевой зрелости в области цифровых технологий и сроки достижения этого уровня. Заказчик или потенциальный потребитель продукции может устанавливать в конкурсной документации допустимый уровень цифрового развития предприятия для проведения конкурсного отбора организаций (вторая сторона). Организации по независимой оценке уровня цифровых возможностей организаций и сертификации могут разрабатывать требования и нормативные документы для различных категорий промышленных предприятий и последующего проведения оценки соответствия этим нормативным документам (третья сторона).

Библиографический список

1. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии [Электронный ресурс]: Рабочий доклад департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково». Июль 2019. — Режим доступа к цифровой редакции доклада: <https://www.skolkovo.ru/odm3>.
2. Федюкин В.К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции: учебное пособие / В.К. Федюкин. — Москва: КНОРУС, 2017. — 320 с.
3. Поляков С.Д., Быстрикова В.А. Управление качеством в жизненном цикле программных средств: монография / С.Д. Поляков, В.А. Быстрикова. — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2019. — 183 с.: ил.
4. Поляков С.Д. Сертификация программной продукции: монография / С.Д. Поляков. — 2-е изд., стер. — Старый Оскол: ТНТ, 2018. — 412 с.
5. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. — М.: Стандартинформ, 2015. — 54 с.

Поляков Сергей Дмитриевич — канд. техн. наук, доц. кафедры информационных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

s.polyakov@stankin.ru

Быстрикова Валерия Александровна — старший преподаватель кафедры информационных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

v.bystrikova@stankin.ru

Polyakov Sergey Dmitrievich — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Information systems” of MSUT “STANKIN”

s.polyakov@stankin.ru

Bystrikova Valeria Alexandrovna — senior teacher at the sub-department of “Information systems” of MSUT “STANKIN”

v.bystrikova@stankin.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

STATEMENT OF THE PROBLEM OF A DIGITAL CONTROL MODEL CONSTRUCTING OF A DC EXECUTIVE MOTOR WITH EXCITATION FROM PERMANENT MAGNETS

Создание модели цифрового управления двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов реализовано на основе адекватной имитационной компьютерной модели используемого двигателя. Имитационная модель позволяет построить фазовую траекторию для конкретного значения управляющего воздействия u_{a0} в фазовой плоскости (n, M_s) . Сформулирована задача определения управляющего воздействия u_{a0} , соответствующего заданной фазовой траектории на фазовом портрете.

The creation of a digital control model of a DC motor with excitation from permanent magnets is implemented on the basis of an adequate simulation computer model of the motor used. The simulation model allows you to build a phase trajectory for a specific value of the control action u_{a0} in the phase plane (n, M_s) . The problem of determining of the control action u_{a0} corresponding to a given phase trajectory on a phase portrait is formulated.

Ключевые слова: цифровое управление, двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, имитационная компьютерная модель, управляющее воздействие, фазовая траектория, фазовый портрет.

Keywords: digital control, DC motor with excitation from permanent magnets, simulation computer model, control impact, phase trajectory, phase portrait.

Управление движением рабочих органов современного металлорежущего станка осуществляет автоматическая система регулируемых многодвигательных электроприводов. Эта система представляет собой сложный электромеханический комплекс с программными связями, содержащий элементы различной физической природы и управляемый с помощью цифровых электронных средств. Поэтому построение и реализация такой системы требует разработки соответствующих моделей всех элементов и алгоритмов управления с учетом связей [1].

Исполнительным устройством в электроприводе является электродвигатель. Привод главного движения станка, как правило, конструируется на основе асинхронного двигателя (АД). Электроприводы подачи, требующие высокой точности и динамической гибкости, содержат более простые в управлении двигатели постоянного тока (ДПТ), как с электромагнитным возбуждением, так и с возбуждением от постоянных магнитов (ДПТМ).

При моделировании электропривода как системы автоматического управления двигатель рассматривается в качестве основного объекта управления [2].

Смысл управления двигателем сводится, по существу, к переводу его из одного устойчивого рабочего состояния с определенным вектором выходных перемен-

ных в заданное другое. Этот процесс осуществляется путем соответствующего изменения вектора входных управляющих воздействий. Для ДПТ с электромагнитным возбуждением — это вектор управляющих напряжений $U^T = (U_a, U_f)$, где U_a — напряжение на обмотке якоря, U_f — напряжение на обмотке возбуждения. Для АД это вектор $(f_1, U_{\phi 1})$, где f_1 — частота питающего напряжения (синхронная частота), $U_{\phi 1}$ — действующее значение фазного напряжения на обмотке статора.

Цель управления исполнительным электродвигателем заключается в получении определенных технологических параметров. Для достижения цели формулируется задача определения по заданным значениям выходных переменных электродвигателя соответствующих значений управляющих воздействий. В качестве выходных переменных, в общем случае, рассматриваются электромагнитный момент на валу двигателя M_s , скорость вращения ротора n и угол поворота ротора Θ .

Повышение эффективности работы современного электропривода достигается применением систем цифрового управления. Это требует наличия цифровых моделей исполнительных двигателей. В общем случае такая цифровая модель должна связывать вектор значений выходных переменных с вектором значений управляющих воздействий.

В связи с этим возникает задача создания цифровой модели, которая может быть решена на основе адекватной имитационной модели используемого двигателя в наиболее подходящей программной среде. Для решения подобных задач управления электро-механическими системами весьма эффективна программная среда *NI MultiSim* [3]. Сочетание простых интерфейсов, алгоритмически совпадающих со многими используемыми сегодня программными продуктами, богатой библиотеки моделей электрических и электронных элементов и сравнительно невысокой стоимости сделали программу весьма привлекательной для научной работы. Возможность численного моделирования элементарных электротехнических устройств на схемотехническом уровне и наличие в программе типовых блоков, выполняющих математические операции (суммирование, интегрирование, умножения, деления и др.) позволяют моделировать процессы преобразования электромагнитной энергии в механическую на уровне имитации аналитических соотношений, составленных по физическим законам.

Проведение виртуального эксперимента на имитационной модели в программе *Multisim* является наглядным, близким к реальному физическому процессу, благодаря возможности отображения на экране монитора схемы исследуемого устройства и контрольно-измерительных приборов, передние панели которых с клавишами и рукоятками управления максимально приближены к их промышленным аналогам. А возможность импорта данных из *MultiSim* в программы *Microsoft Excel* и *MathCAD* обеспечивает решение задач управления с помощью созданных имитационных моделей на современном цифровом уровне.

Аналитический обзор существующих в программной среде *NI MultiSim* имитационных моделей различного типа двигателей (АД, ДПТ, ДПТМ) позволил разработать алгоритм решения сформулированной целевой задачи управления [4].

1. Строится математическая модель двигателя.
2. Строится адекватная управляемая имитационная модель двигателя, позволяющая определять его характеристики.

3. Проводится параметризация имитационной модели под конкретный двигатель.

4. С помощью имитационных моделей строятся семейства пусковых характеристик при значениях управляющих воздействий из ожидаемого диапазона их изменения.

5. По семействам пусковых характеристик строятся семейства механических характеристик исполнительного двигателя по каждой из управляющих переменных.

6. На основании массивов координат полученных семейств механических характеристик могут быть построены в программах *MathCAD* или *Excel* поверхности выходных переменных в рассматриваемых диапазонах изменения управляющих воздействий.

7. Для получения областей управляемости по каждой выходной переменной в соответствии с граничными условиями устойчивой работы двигателя определяются их граничные поверхности. При этом необходимо выбрать доверительный, технически реализуемый для данного типа двигателей, интервал регулирования, внутри которого будут определяться значения управляющих переменных. Внутри этих поверхностей заключены трехмерные пространства, которые являются областями управляемости по каждой выходной переменной.

8. Представленные массивами поверхности по каждой выходной переменной аппроксимируются полиномами.

9. Таким образом создается цифровая модель исполнительного электродвигателя.

Далее на основе этой модели решается задача определения значения управляющего воздействия (вектора управляющих воздействий) по заданным координатам рабочей точки.

Предлагаемый алгоритм решения задачи может быть реализован на базе программных комплексов *MultiSim 10*, *Microsoft Excel* и *MathCAD*, обладающих возможностью трансляции промежуточных результатов из одной программы в другую. Схема алгоритма представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Общая схема решения задачи определения значений вектора управления в области управляемости исполнительного двигателя

Приведенный алгоритм позволяет максимально автоматизировать промежуточные процедуры для определения требуемых конечных результатов.

В данной работе рассмотрен подготовительный этап реализации цифровой модели управления двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, который заключается в построении имитационной компьютерной модели ДПТМ и в постановке задачи управления.

Управление ДПТМ, как правило, осуществляется по цепи якоря напряжением U_a . В качестве выходных переменных для построения цифровой модели управления удобно рассматривать электромагнитный момент на валу двигателя M_3 и скорость вращения ротора n (см. рис. 1).

Был выбран наиболее удобный с позиций электромеханики вариант реализации математической модели электромеханического преобразователя. За основу взята математическая непосредственная схемотехническая модель в виде системы (1)–(4). [5]

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a di_a(t)/dt + K_M(i_a)\Omega(t); \quad (1)$$

$$K_M(i_a)i_a(t) - J_\Sigma d\Omega(t)/dt - \beta_T \Omega(t) - M_{BH}(t) = 0; \quad (2)$$

$$e_a(t) = K_M(i_a)\Omega(t); \quad (3)$$

$$M_3(t) = K_M(i_a)i_a(t). \quad (4)$$

Математическая модель ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов (1)–(4) является нелинейной, нестационарной с внутренней обратной связью по току якоря. Система (1)–(4) аналитического решения не имеет.

Для дальнейшей работы целесообразно преобразовать уравнения (1) и (2) в уравнения состояния (5), (6).

$$di_a(t)/dt = -R_a/L_a i_a(t) - K_M(i_a)/L_a \Omega(t) + 1/L_a u_a(t); \quad (5)$$

$$d\Omega(t)/dt = (K_M(i_a)/J_\Sigma)i_a(t) - \beta_T/J_\Sigma \Omega(t) - 1/J_\Sigma M_{BH}(t); \quad (6)$$

Эти уравнения также не имеют аналитического решения. Однако построение фазовых траекторий, являющихся решением уравнений (5), (6) в плоскости фазовых координат $(i_a(t), \Omega(t))$, можно реализовать методом имитационного компьютерного моделирования и проведения вычислительного эксперимента на созданных для этой цели моделях.

Полученные в результате вычислительного эксперимента динамические характеристики (выходные переменные двигателя $n(t)$ и $M_3(t)$) позволяют построить масштабированные решения системы (1)–(4), т.е. траектории в фазовой плоскости $(M_3(t), n(t))$. На рисунке 2 представлена фазовая траектория, полученная на имитационной модели высокомоментного двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Параметры модели

соответствуют параметрам реального двигателя типа УПС6 [6].

Составленный из этих траекторий фазовый портрет (рис. 3) является основой для решения задачи нахождения возможных значений управляющего воздействия $u_a(t)$. На рисунке 3 фазовые траектории соответствуют напряжениям:

1 — $U_a = 10$ В; 2 — $U_a = 20$ В; 3 — $U_a = 30$ В; 4 — $U_a = 40$ В; 5 — $U_a = 50$ В.

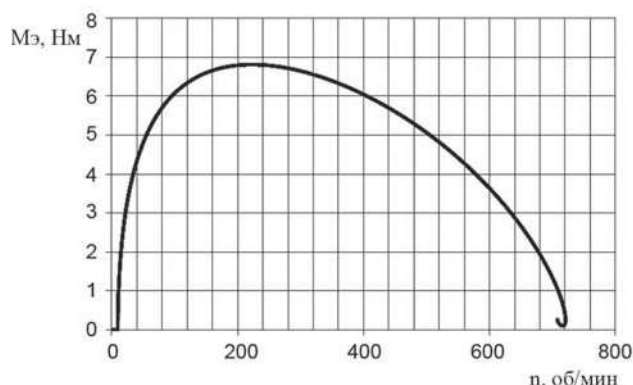


Рис. 2. Номинальная траектория ДПТ типа УПС6 при $U_a = 27,1$ В

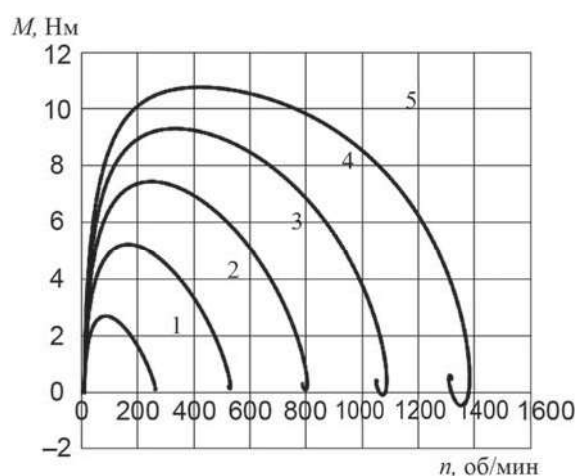


Рис. 3. Фазовый портрет ДПТ типа УПС6

В качестве компьютерной имитационной модели принята разработанная в программной среде *Multisim* полная имитационная модель ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов [7]. Модель построена на базе уравнений (5), (6) с учетом уравнения связи (4) и выражения перехода (7).

$$n(t) = (30/\pi)\Omega(t) \quad (7)$$

Схема этой модели представлена на рисунке 4.

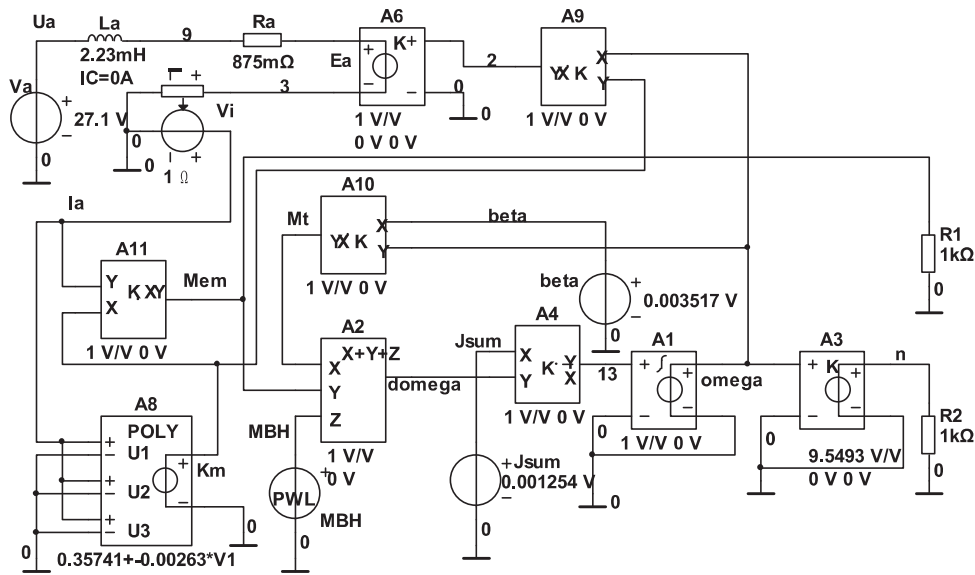


Рис. 4. Схема полной имитационной модели ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов в программной среде MultiSim

В имитационной модели функцию источника магнитного потока полюса осуществляет библиотечный блок POLY (Polynomial Source).

Для практического дальнейшего использования модели была проведена параметризация модели. Настройка блока A8 (POLY) выполнена на основе экспериментальных данных как достаточно точный вариант, либо в первом приближении реальной зависимости $K_M(i_a)$ в виде линейной функции. Координаты двух точек $K_M(0)$ идеального холостого хода и $K_M(i_{aном})$ режима номинальной нагрузки определялись расчетным путем на основе выражений (8)–(10). [8]

$$K_M(I_{aном}) = E_{aном} / \Omega_{ном}; \quad (8)$$

$$E_{aном} = U_{aном} - R_a I_{aном}, \text{ В}; \quad (9)$$

$$I_{aном} = P_{aном} / U_{aном} = P_{1ном} / U_{aном}, \text{ А}. \quad (10)$$

При этом для идеального холостого хода:

$$E_{ax} = U_a, \quad I_{ax} = 0; \quad (11)$$

$$n_{х.ид.} = n_0 = n_{ном} E_{ax} / E_{aном}. \quad (12)$$

Вычислительный эксперимент выполнялся в этом случае для конкретной конструкции преобразователя в соответствии с целями и задачами моделирования.

В качестве физического аналога при параметризации модели принят высокомоментный ДПТ типа УПС6, применяемый в станочных электроприводах подач. На рисунке 5 приведены результаты виртуального эксперимента на основе полной имитационной модели ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов.

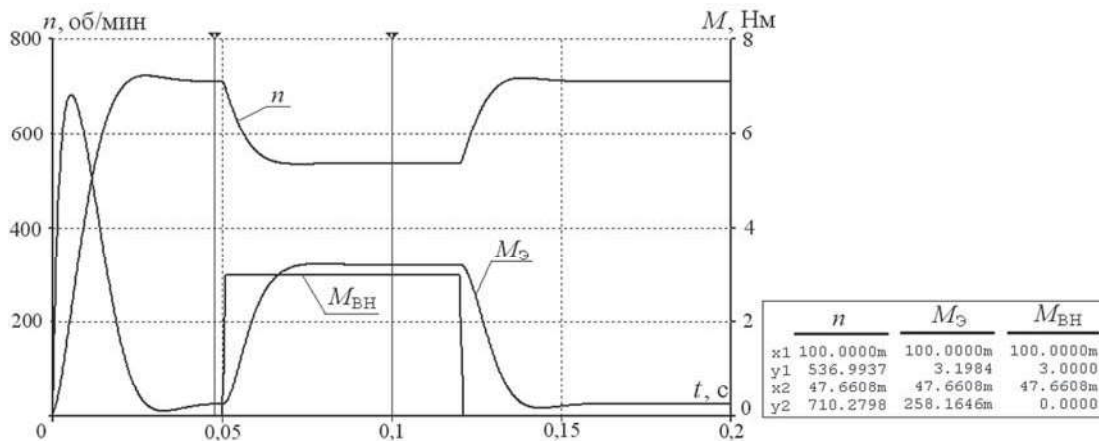


Рис. 5. Временные зависимости $n(t)$, $M_{Э}(t)$, $M_{BH}(t)$, ДПТ типа УПС6 при $u_a = 27,1 \text{ В}$

При проведении виртуального эксперимента моделировались: процесс прямого пуска двигателя в холостом режиме при номинальном значении напряжения U_a на обмотке якоря, включение внешней нагрузки $M_{\text{ВН}}(t)$ (ступенчатой функции) и её последующее отключение.

Можно сделать вывод, что выходные переменные двигателя $n(t)$ и $M_3(t)$ адекватно отражают динамические и статические процессы, вызванные управляющим воздействием $U_a(t)$ и внешним возмущением $M_{\text{ВН}}(t)$. Очевидно, что модель позволяет исследовать динамику механической и электромагнитной составляющих единого процесса преобразования.

Выбранная модель ДПТМ является открытой, удобной для модификаций под конкретные задачи моделирования.

На основе этой модели, используя идею сквозного моделирования *MultiSim 10* → *Microsoft Excel* → *MathCAD* в процессе управления, частная задача управления может быть сформулирована как задача определения значения управляющего воздействия u_{a0} , соответствующего заданной фазовой траектории на фазовом портрете в фазовой плоскости (n, M_3). Автоматизация решения этой задачи представляет собой реализацию цифровой модели управления ДПТМ.

Библиографический список

1. Кузовкин В.А., Филатов В.В. Моделирование электрических и электронных элементов автоматики. Конструкторско-технологическая информатика — 2005: Труды конгресса. V международный конгресс. — М.: ИЦ ФГБОУ ВПО «МГТУ «СТАНКИН». «Янус-К» 2005. — 358 с.
 2. Кузовкин В.А. Основы автоматического управления: Учебник. — М.: ИЦ ФГБОУ ВПО «МГТУ «СТАНКИН». 2006. — 268 с.
 3. Хернтер Марк Е. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. (Пер. с англ.) — М.: Издательский дом ДМК — пресс. 2006. — 487 с.
 4. Филатов В.В., Чумаева М.В., Сорокин В.О. Задача создания цифровой модели управления исполнительным двигателем электропривода станочного оборудования // Вестник МГТУ «СТАНКИН». М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». №3(50). 2019. С. 25–29.
 5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Учеб. для вузов. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Высш. шк. 2001. — 327 с: ил.
 6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / С74 Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. — М.: Энергоатомиздат. 1988. — 456 с.
 7. Чумаева М.В. Имитационное моделирование исполнительных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. — Материалы XV международной научно-практической конференции «Академическая наука — проблемы и достижения». 31–33 марта 2018. Nortoh Charleston, USA. Том 2. С. 34–37. ISBN 978-1987637250.
 8. Филатов В.В., Чумаева М.В. Идентификация моделей исполнительного двигателя постоянного тока станочного электропривода с использованием опытных данных // Евразийский союз ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал, № 10(43). 2017. 1 часть. С. 64–69. ISSN 2411-6467.
- Филатов Владимир Витальевич** — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
vfilatov45@mail.ru
- Чумаева Марина Вячеславовна** — канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mvcvmcvmc@yandex.ru
- Афонин Кирилл Сергеевич** — аспирант кафедры промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
kirik312@mail.ru
- Filatov Vladimir Vitalyevich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor, head of the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”
vfilatov45@mail.ru
- Chumaeva Marina Vyacheslavovna** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”
mvcvmcvmc@yandex.ru
- Afonin Kirill Sergeevich** — postgraduate student at the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”
kirik312@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАБОЛОЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИЙ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE AUTOMATED DETERMINATION OF THE SWAMPINESS OF THE TERRITORIES OF THE ARKHANGELSK REGION BASED ON DEEP NEURAL NETWORKS

Изложен способ определения заболоченности территорий Архангельской области на основе глубоких нейронных сетей. Приведено решение задачи выделения заболоченных территорий на основе данных спутниковой съемки.

A method for determining the swampiness of the territories of the Arkhangelsk region based on deep neural networks is outlined. A solution to the problem of identifying wetlands based on satellite imagery data is given.

Ключевые слова: заболоченные территории, спутниковые снимки, глубокие нейронные сети, методика, алгоритм.

Keywords: wetlands, satellite images, deep neural networks, technique, algorithm.

Введение

Болота являются важным природным ресурсом. Они, как и лес, по праву называются «легкими» планеты, поглощая большое количество углеродного газа и выделяя кислород. Болота являются экологической средой для многих растений и животных. Однако значительные заболоченные территории можно использовать более рационально, например, передав их в землепользование или выпас скота. Часто заболоченные территории затрудняют доступ к лесным ресурсам. Актуальная информация о заболоченных территориях необходима для контроля деятельности в отношении водно-болотистых угодий [1–5].

Разработка методики автоматизированного определения заболоченных территорий по данным спутниковых снимков с высокой точностью позволит сохранить природные ресурсы и построить оптимальные планы по развитию территорий Архангельской области, что определяет актуальность исследования. Для своевременного отслеживания данных о заболоченных территориях было принято решение использовать данные спутниковой съемки Архангельской области и разработать программный модуль в свободно распространяемой ГИС по их автоматизированной обработке.

Основными этапами, необходимыми для определения заболоченных территорий при помощи данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), являются:

- 1) разработка технологии непрерывной обработки данных спутниковой съемки, включающая выбор изображений, создание векторной маски водно-болотистых угодий на конкретную территорию;
- 2) разработка архитектуры глубокой нейронной сети и ее обучение, включая подбор параметров для автоматизированного определения заболоченных территорий;
- 3) разработка программного модуля в ГИС QGIS, включая интеграцию разработанной нейронной сети.

Далее подробно опишем каждый этап.

Получение и подготовка исходных данных

В исследовании использовались спутниковые снимки с космического аппарата Landsat 8. Изображения с выбранного космического аппарата включают мультиспектральные данные, позволяющие эффективно решать поставленные задачи. Необходимо также отметить большой и регулярно пополняемый архив данных со спутника.

Полученные снимки прошли процедуру предварительной обработки и подготовки для тематической интерпретации. Для подачи изображения в нейронную

сеть будет использоваться стандартный формат «png». Для его создания необходимо выбрать 3 канала, которые составят RGB-композит. Канал 4 хорошо подходит для определя растительности, а на каналах 6 и 5 хорошо визуализируется выделения тепла от заболоченных территорий. Вследствие чего для дальнейшей работы использовались каналы 6, 5 и 4, два ближних инфракрасных (БИК) и красный соответственно. Пример полученного изображения представлен на рисунке 1.

После обработки снимков были выделены области с болотами для обучения нейронной сети. Данная информация содержится на карте OpenStreetMap (OSM), которая бесплатно распространяется в сети Интернет и создается силами добровольцев. OSM содержит тэг `natural=wetland`, который хранит информацию о водноболотистых угодьях в удобном формате. После обработки слоя в QGIS, получили векторный слой с болотами, представленный на рисунке 2.

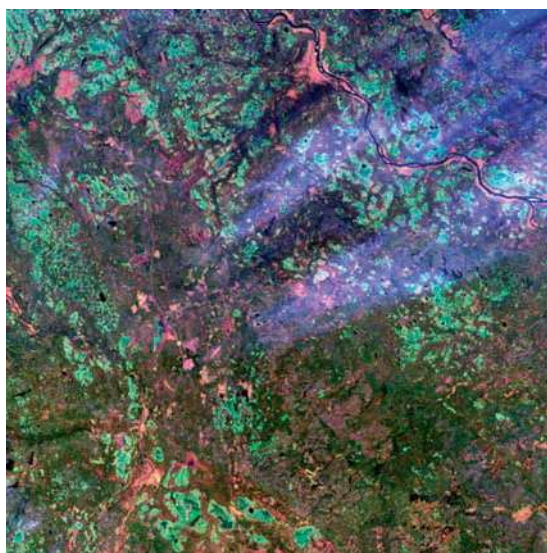


Рис. 1. Пример космического снимка заболоченной территории

Для подачи снимком в нейронную сеть их предварительно нарезали на изображения при помощи скрипта на языке Python. Пример полученных снимков представлен на рисунке 3. Далее рассмотрим разработку модели глубокой нейронной сети для выделения заболоченных территорий.

Разработка модели для определения участков заболоченности территории

Автоматизированное определение заболоченности территории по данным спутниковой съемки предлагается посредством разработки модели, использующей для настройки параметров самообучаемые алгоритмы на основе технологий глубоких нейронных сетей. Задача выделения на космическом снимке участков болот относится к задаче сегментации. Подобная задача раньше решалась морфологическими методами обработки



Рис. 2. Векторный слой с болотами

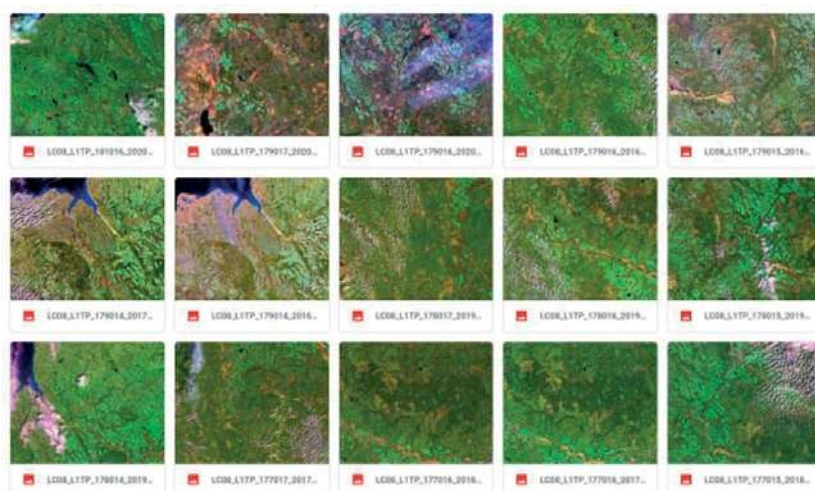


Рис. 3. Пример подготовленных изображений

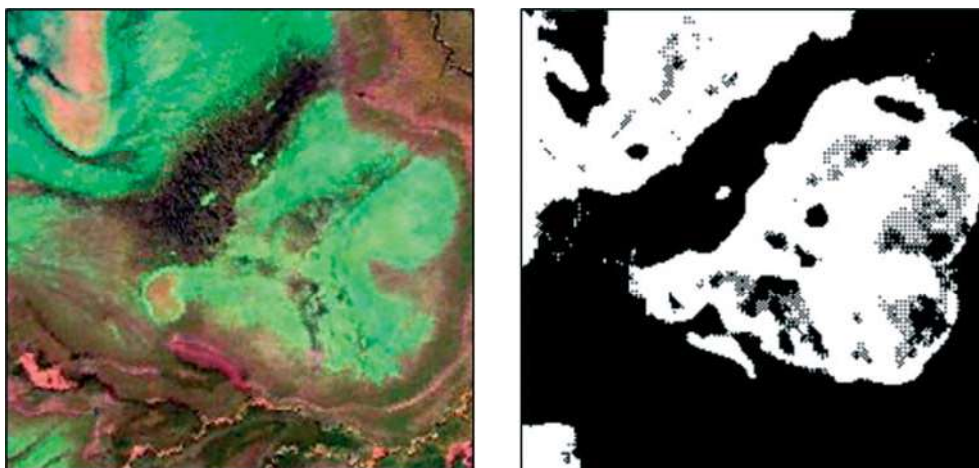


Рис. 4. Пример пар изображений в обучающей выборке: часть космического снимка и маска болот территории

изображений [6, 7], основанной на анализе только яркостных характеристик снимков в нескольких каналах, в совокупности с экспертной оценкой принадлежности выделенных областей к целевому классу болот. Применение в совокупности таких технологий глубоких нейронных сетей для задачи сегментации, как свертка, пулинг и повышающая дискретизация позволяют сочетать не только яркостные характеристики, но и текстурные, объектные признаки на космическом снимке со знаниями эксперта, заложенными в заранее подготовленной маске болот территории в качестве учебного образца.

В качестве архитектуры глубокой нейронной сети в модели использовалась U-Net, которая ранее неоднократно показывала высокие результаты при выделении объектов другого типа на космических снимках [8]. Данная архитектура изначально разработана для задачи сегментации и наиболее успешно справляется именно с бинарной сегментацией, к которой относится задача выделения болот на территории. При невысокой требовательности к объему обучающих данных модели на основе архитектуры U-Net быстро обучаются с высоким качеством, достаточным для использования таких моделей в производственных решениях.

В качестве обучающей выборки для модели сегментации болот территории на предыдущем этапе подготовки данных были организованы пары: трехканальное изображение «нарезанная часть космического снимка» — одноканальное изображение «нарезанная часть маски болот территории Архангельской области» (рис. 4).

Размер изображений в парах выбран 224x224 пикселя как наиболее оптимальный с точки зрения затрат вычислительных мощностей при обучении модели. Объем подготовленной выборки составил 436 пар изображений, позволивший получить достаточный результат при невысокой продолжительности обучения

модели. После нескольких экспериментов опытным путем всю выборку разделили на обучающую и тестовую в пропорции 9:1, таким образом, отдав значительную часть для обучения, что повысило качество сегментации. Корректность работы модели при сегментации можно оценить на небольшом объеме выборки. Также для повышения качества обучения модели была проведена аугментация данных: поворот от 0° до 35°, вертикальное и горизонтальное отражение с вероятностью 0,1 и 0,5 соответственно.

Процесс непосредственно обучения модели нейронной сети помимо автоматизированной настройки весовых коэффициентов сети заключался в эмпирическом подборе параметров модели: количество эпох обучения, размер мини выборки, выбор функции ошибки, выбор метода оптимизации, стартовая скорость обучения модели, выбор функций активации в сверточных слоях. Часть параметров, таких как число каналов на входе и выходе, размер ядер сверток и подвыборки была определена исходя из применения архитектуры нейронной сети в аналогичных задачах, приведших к успеху. Так значения число каналов на входе равно 3, а на выходе 1, так как на вход поступают трехканальные изображения в формате RGB, а выходом являются маски болот с одним каналом. Размер ядра свертки для каждого сверточного слоя 3x3, а для слоев подвыборки и повышающей дискретизации 2x2.

В процессе эмпирического подбора параметров модели для финального обучения были использованы следующие параметры: начальная скорость «1e-4», изменяемая в процессе обучения алгоритмом оптимизации; алгоритм оптимизации Adam, вобравший лучшие свойства алгоритмов AdaGrad и RMSProp, способный работать с редкими градиентами в задачах с зашумленными данными, часто показывающий хороший результат для большинства задач; функция активации в сверточных слоях ReLU; размер мини выборки 30; число эпох для обучения 4.

Встраивание обученной модели в программный продукт

В результате обученная модель нейронной сети позволяет проводить автоматизированное определение заболоченности территории по данным спутниковой съемки на примере территории Архангельской области. Данная модель была интегрирована в ГИС QGIS как отдельный плагин. В разработанном плагине можно указать директорию с файлами для определения заболоченности и директорию для выгрузки результата обработки моделью, представляемом в виде масок с выделением расположением болот на территории. Для импорта необходимых библиотек использовалась встроенная оболочка Python для работы — OSGeo4W Shell. Для разработки интерфейса плагина была применена библиотека QT. Внешний вид разработанного плагина приведен на рисунке 5.

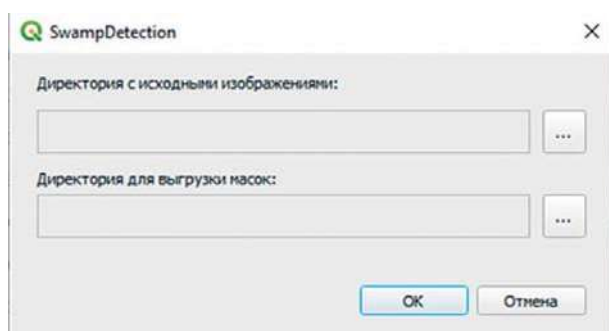


Рис. 5. Экран плагина в QGIS

При обработке космических снимков заболоченной территории Архангельской области (рис. 6) был получен результат, представленный на рисунке 7 (нижняя строка) в сравнении с масками болот территории из открытых источников (верхняя строка).

Результат обработки космических снимков визуальнo интерпретируется, границы болот определяются, присутствуют незначительные вбросы белых пятен в маске. Погрешности можно скорректировать при дальнейших исследованиях путем использования более точных масок при дообучении модели нейронной сети и её тонкой подстройке. Скорость обработки снимков позволит определять заболоченность достаточно больших территорий в приемлемые сроки и проводить сравнительный анализ состояния болот.

Выводы

Разработана методика и алгоритмы автоматизированного определения заболоченности территорий Архангельской области по космическим снимкам на основе глубоких нейронных сетей, позволяющая обрабатывать большие объемы информации без участия эксперта/человека.

Разработана и обучена модель для определения участков заболоченности территории на примере Архангельской области на основе модифицированной архитектуры нейронной сети U-Net, позволяющая учитывать не только яркостные характеристики космического снимка,

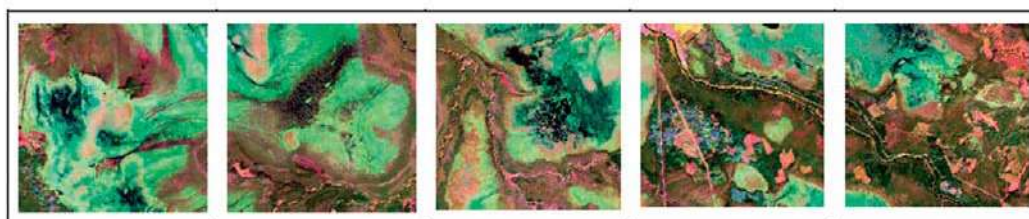


Рис. 6. Космические снимки заболоченной территории для обработки в плагине QGIS

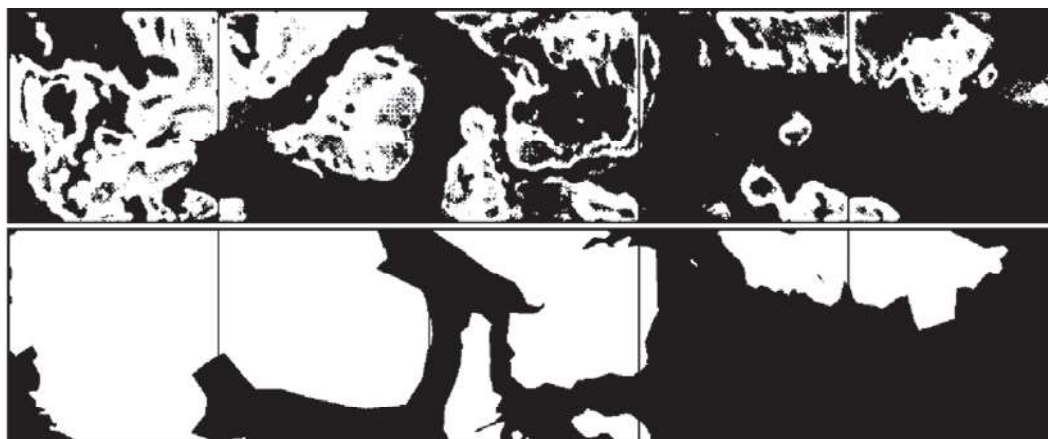


Рис. 7. Результат обработки снимков моделью, интегрированной в плагин QGIS

но и тектурно-объектные, что позволило в автоматическом режиме создавать маски болот местности.

На основе разработанной методики разработан модуль автоматизированной обработки космических снимков, который обеспечивает подготовку векторных карт, позволяющих оценивать состояние заболоченных территорий, принимать меры для сохранения экосистемы Архангельской области.

Разработанные методика и инструментальные средства могут быть использованы для тематического дешифрирования заболоченных территорий и применимы для территорий со сложными природно-климатическими условиями, площадью более 5 000 га.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Архангельской области проект № 22-11-20025.

Библиографический список

1. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / БОЛОТО — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/biology/text/1876273/>.
2. Консультант Плюс [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / Водный кодекс Российской Федерации — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/.
3. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]: [официальный сайт] Водный кодекс Российской Федерации — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9014361>.
4. Regulation [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / Проект федерального закона «О внесении изменений в Водный кодекс Российской Федерации в части использования болот для целей разведки месторождений полезных ископаемых и их добычи, строительства и реконструкции линейных объектов» — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: <https://regulation.gov.ru/Npa/Print/85808>.
5. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / При поддержке Минприроды России состоялся круглый стол по реализации проектов восстановления торфяных болот — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: http://mnr.gov.ru/press/news/pri_podderzhke_minprirody_rossii_sostoyalsya_kruglyy_stol_po_realizatsii_proektov_vosstanovleniya_to/.

6. Вестник Томского государственного университета [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / Изучение морфологической структуры микроландшафтов Васюганского болотного комплекса на основе дешифрирования космических снимков | Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 388. DOI: 10.17223/15617793/388/41 — Электрон. дан. — [2022]. — Режим доступа: http://journals.tsu.ru/vestnik/&journal_page=archive&id=1104&article_id=31231.

7. СОВЗАНТ [Электронный ресурс]: [официальный сайт] / Картографирование болотных микроландшафтов на основе спектральной классификации космических снимков RapidEye. — Электрон. дан. — [2021]. — Режим доступа: https://sovzond.ru/upload/iblock/234/8_46-51.pdf.

8. Соловьев Р.А., Тельпухов Д.В., Кустов А.Г. Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе модифицированной свёрточной нейронной сети UNET / Инженерный вестник Дона, №4 (2017) — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskaya-segmentatsiya-sputnikovyh-snimkova-na-baze-modifitsirovannoy-svyortchnoy-neyronnoy-seti-unet>.

References

1. Great Russian Encyclopedia-[Electronic resource]: [official. site] / BOLOTO — Electronic data — [2022]. — Access mode: <https://bigenc.ru/biology/text/1876273>.
2. Consultant Plus [Electronic resource]: [official. site] / Water Code of the Russian Federation — Electronic data — [2022]. — Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/.
3. Electronic fund of legal and normative-technical documents [Electronic resource]: [official. website] Water Code of the Russian Federation — Electronic data — [2022]. — Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/9014361>.
4. REGULATION [Electronic resource]: [official. website] / Draft federal law “On Amendments to the Water Code of the Russian Federation with regard to the use of swamps for the purposes of exploration and extraction of mineral deposits, construction and reconstruction of linear facilities” — Electronic data — [2022]. — Access mode: <https://regulation.gov.ru/Npa/Print/85808>.
5. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation [Electronic resource]: [official. site] / With the support of the Ministry of Natural Resources of Russia, a round table was held on the implementation of projects for the restoration of peat bogs — Electronic data — [2022]. — Access mode: http://mnr.gov.ru/press/news/pri_podderzhke_minprirody_rossii_sostoyalsya_kruglyy_stol_po_realizatsii_proektov_vosstanovleniya_to/.

6. Bulletin of the Tomsk State University [Electronic resource]: [official. site] / Study of the morphological structure of the microlandscapes of the Vasyugan bog complex based on the interpretation of space images | Vestn. Tomsk state university 2014. No. 388. DOI: 10.17223/15617793/388/41 — Electronic data — [2022]. — Access mode: http://journals.tsu.ru/vestnik/&journal_page=archive&id=1104&article_id=31231.

7. SOVZANT [Electronic resource]: [official. site] / Mapping of swamp microlandscapes based on the spectral classification of Rapid Eye satellite images. — Electronic data — [2022]. — Access mode: https://sovzond.ru/upload/iblock/234/8_46-51.pdf.

8. Soloviev R.A., Telpukhov D.V., Kustov A.G. Automatic segmentation of satellite images based on a modified convolutional neural network UNET / Engineering Bulletin of the Don, No. 4 (2017) — Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskaya-segmentatsiya-sputnikovyh-snimkov-na-baze-modifitsirovannoy-svyortochnoy-neyronnoy-seti-UNET>.

Шошина Ксения Владимировна — канд. техн. наук, доц. кафедры информационных систем и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
k.shoshina@narfu.ru

Васендина Ирина Сергеевна — канд. техн. наук, доц. кафедры информационных систем и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
i.vasendina@narfu.ru

Паршин Алексей Олегович — магистрант направления «Информационные системы и технологии» ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Алешко Роман Александрович — канд. техн. наук, профессор кафедры информационных систем и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
r.aleshko@narfu.ru

Воронцов Роман Антонович — аспирант направления «Информационные технологии и телекоммуникации» ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
r.voroncov@narfu.ru

Тюрбева Татьяна Борисовна — канд. техн. наук, доц. кафедры информационных технологий и вычислительных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
t.tyrbeeva@stankin.ru

Shoshina Ksenia Vladimirovna — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Information Systems and Information Security” of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
k.shoshina@narfu.ru

Vasendina Irina Sergeevna — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Information Systems and Information Security” of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
i.vasendina@narfu.ru

Parshin Aleksey Olegovich — master degree student of the direction "Information systems and technologies" of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Aleshko Roman Aleksandrovich — candidate Sc. of Engineering, professor at the department of “Information Systems and Information Security” of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
r.aleshko@narfu.ru

Vorontsov Roman Antonovich — postgraduate student of the direction “Information technologies and telecommunications” of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
r.voroncov@narfu.ru

Tyrbeeva Tatyana Borisovna — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Information Technology and Computer Systems” of MSUT “STANKIN”
t.tyrbeeva@stankin.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF THE ELECTRON-BEAM WELDING IN STEADY STATE FOR TESTING THE TECHNOLOGICAL PROCESS

На сегодняшний день, при отработке технологического процесса и получения качественных неразъемных соединений для новых изделий и при обновлении оборудования производится поиск параметров путем проведения натурных экспериментов, что является материально и ресурсозатратным. В данной работе авторами проведено имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки изделия из титанового сплава в COMSOL. В результате для отработки технологического процесса были заданы параметры и получены графики распределения температуры на поверхности изделия, которые свидетельствуют о достижении выдвигаемым требованиям сварного шва — ширина 2 мм, высота 1 мм.

Now, when working out the technological process and obtaining high-quality one-piece connections for new products and when updating equipment, the search for parameters is carried out by conducting full-scale experiments, which is financially and resource-intensive. In this work, the authors carried out simulation modeling of the process of electron beam welding of a titanium alloy product in COMSOL. As a result, for the development of the technological process, parameters were set and graphs of the temperature distribution on the product surface were obtained, which indicate that the requirements of the weld were reached - width 2 mm, height 1 mm.

Ключевые слова: моделирование, скорость сварки, технологические параметры, электронно-лучевая сварка, электронный пучок.

Keywords: modeling, welding speed, technological parameters, electron-beam welding, electron-beam.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) получила широкое распространение в различных отраслях машиностроения [1–3]. Большие технологические возможности ЭЛС достигаются за счет возможности гибкого управления процессом: (1) реализуемость импульсного режима сварки, (2) возможность перемещать пучок по поверхности свариваемого изделия с помощью быстродействующей отклоняющей системы по любому сложному контуру. Узкий шов, параллельность его границ и малая протяженность зоны термического влияния (ЗТВ) обуславливают незначительные линейные и угловые деформации свариваемых изделий.

Установки для ЭЛС как объект автоматизации представляют собой сложный комплекс [4, 5], в который входят электромеханические манипуляторы, вакуумное оборудование и мощное энергетическое оборудование. В настоящее время развитие средств автоматического управления процессом ЭЛС осуществляется как по пути совершен-

ствования локальных регуляторов, используемых для стабилизации и управления отдельными параметрами процесса, так и по пути создания комплексных систем управления, осуществляющих взаимосвязанное регулирование параметров процесса с целью формирования качественного сварного соединения. Такие автоматизированные системы [6, 7] дают возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия.

Размеры, конфигурация и качество формирования швов при ЭЛС определяются устойчивостью, формой и размерами парового канала сварочной ванны, которые в свою очередь зависят от мощности, эффективного радиуса, угла сходимости луча, положения фокального пятна луча, пространственного положения стыка, теплофизических свойств металла и скорости сварки.

Авторами работ [8–10] проводилось имитационное моделирование в среде COMSOL с целью исследовать влияния изменения мощности на распределения температурного поля. В работе задавались ток луча, ускоряющее напряжение и скорость сварки, однако, изменялся только ток луча, в то время как было зада-

но оптимальное значение скорости сварки для данного изделия, а ускоряющее напряжение было равно 30 кВ согласно паспорту электронно-лучевой пушки.

Целью данной работы является отработка технологического процесса с заданными параметрами (скорость сварки, ток луча, ускоряющее напряжение) для получения стабильного качества сварного шва изделий из титанового сплава при электронно-лучевой сварке. Авторами предлагается проведение моделирования процесса ЭЛС в установившемся режиме в среде COMSOL для проверки эффективности подхода.

Верификация математической модели путем имитационного моделирования в среде COMSOL Multiphysics

В качестве мощности, которая задается в данной работе, принята удельная мощность (Вт/см²), позволяющая рассчитать мощность электронного луча в зависимости от его диаметра [11]:

$$q_2 = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \quad (1)$$

где d — диаметр электронного луча; I — ток электронного луча; U — ускоряющее напряжение.

Тогда как при воздействии в импульсном режиме, мощность (2) можно вычислить следующим образом:

$$Q = I \cdot U \cdot f \cdot \tau \quad (2)$$

где I — величина тока в импульсе, f — частота следования импульсов, τ — длительность импульса.

В качестве образцов для создания модели были взяты промышленные образцы, изображенные на рисунке 1.

Первая часть изделия показана на рисунке 1а и представляет собой полый цилиндр из титанового сплава (Ti-4Al-3Mo-1V) высотой 80 мм и диском в виде крышки диаметром 76 мм, толщиной 12 мм. Вторая часть изделия, изображенная на рисунке 1б, представляет собой также цилиндр, только с открытой нижней частью и открытой верхней частью, на которой присутствует полость для диска в виде крышки, где толщина стенки, вдоль которой будет производиться сварка, порядка 3 мм. Готовое изделие представляет собой корпус для двигателя.

Моделирование будет проводиться в платформе для численного моделирования [12–15]. На первоначальном этапе был разработан эскиз предполагаемого корпуса двигателя. Готовый эскиз представлен на рисунке 2.

На следующем шаге были заданы технологические параметры требуемого режима (мощность 95 Вт, скорость сварки 1,2 см/с), а также оптимальные значения времени ввода и вывода электронного луча, полученные авторами в предыдущих работах [16–19]. Выбраны зоны нагрева и задана траектория движения



Рис. 1. Заготовка, где: а – часть первая изделия, б – часть вторая изделия

луча. Основным требованием является получение требуемого сварного шва, а именно глубина шва должны быть равна 1 мм, ширина 2 мм.

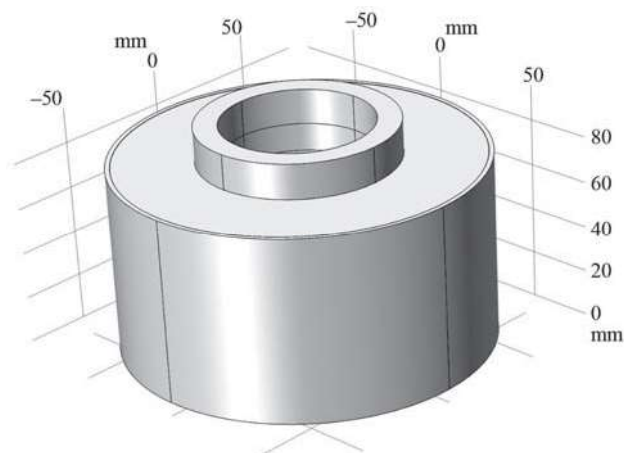


Рис. 2. Эскиз готового изделия при помощи встроенного модуля CAD

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, температура изделия в околошовной зоне сварного шва равномерна, это обосновано тем, что предлагаемые модели для вычисления распределения температуры учитывают текущую температуру в процессе сварки, что препятствует перегреву в зоне сварного шва.

Таким образом, основываясь на полученных результатах моделирования и на рисунке 3, можно судить, что выдвигаемые требования к размерам сварного шва выполняются, а также о применимости предлагаемых моделей и метода.

Проведение натуральных экспериментов

Верификация подхода, предложенного авторами, осуществлялась на экспериментальном стенде электронно-лучевой сварки. В распоряжении авторов для реализации проекта имеется следующее оборудование:

- 1) Электронно-лучевая пушка (ЭЛА-60/60).
- 2) Источник ускоряющего напряжения, позволяющий работать в пределах от 30 до 60 кВ.

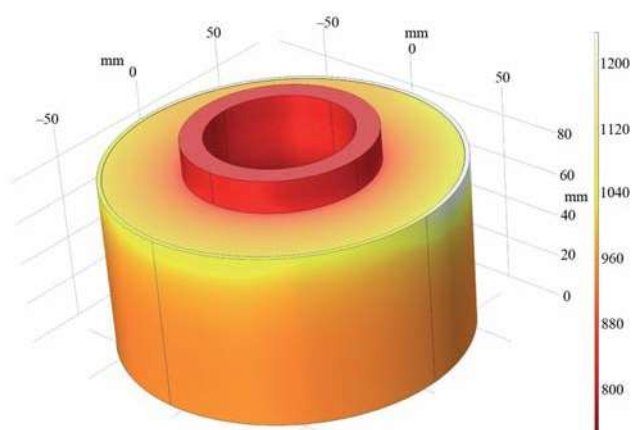


Рис. 3. Эскиз готового изделия при помощи встроенного модуля CAD



Рис. 4. Образец двигателя после электронно-лучевой сварки на представленном оборудовании

- 3) Управляемый электрический привод высокоточного позиционирования для манипулятора (ASDA-B2).
- 4) Вакуумная камера с системой вакуумирования.
- 5) Турбомолекулярная откачная система MT-Turbo 65D/0/8 KF40M MTM.
- 6) Система дифференциальной откачки воздуха.
- 7) Вакуумный затвор с электромагнитным приводом ISO63.

Для управления ЭЛС применяется промышленный компьютер UNO-2484G-7532AE, с интерфейсной платой ввода/вывода информации PCI-1710 и с разъемами RS-232 для управления.

Для подтверждения результатов, произведена сварка образца на имеющейся установке ЭЛС, выполнена при следующих рекомендуемых технологических параметрах режима сварки: — ток фокусировки — 139 мА, ток сварки 67 мА, ускоряющее напряжение — 29,8–30 кВ, скорость сварки — 1,2 м/с, расстояние до места стыка — 60 мм.

При сварке требовалось обеспечить следующие размеры сварного шва: высота (глубина провара) — 1–1,5 мм, ширина 2 (±0,3) мм.

На рисунке 4 показано изделие в результате ЭЛС на имеющейся установке.

После сварки по рекомендуемым технологическим параметрам был произведен металлографический контроль и замеры ширины сварного шва и глубины проплавления (табл. 1).

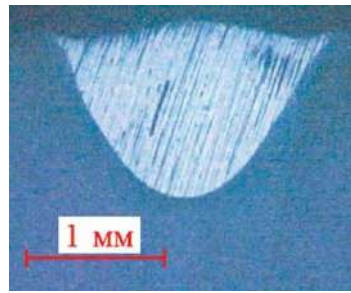
Как видно из результатов замера, полученный сварной шов соответствует выдвигаемым требованиям.

Заключение

В данной работы авторами было проведено имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки диска с цилиндром из титанового сплава (Ti-4Al-3Mo-1V) в COMSOL Multiphysics. Таким образом, была отработана предлагаемая технология моделирования для получения эффективных технологических параметров при электронно-лучевой сварке конструкций аэрокосмического назначения.

По результатам моделирования был получен режим со следующими технологическими параметрами: скорость сварки 1,2 см/с, ток луча 67 мА, ускоряющее

Таблица 1. Результаты металлографического контроля

Глубина провара, мм	Ширина шва, мм	Фото
1,2	2	

напряжение 30 кВ, ток фокусировки 139 мА, обеспечивающий заданные требования к размерам сварного шва: ширина — 2 мм, высота — 1 мм.

Библиографический список

1. Терновой Е.Г., Бондарев А.А. Электронно-лучевая сварка толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов АМГ6 и М40 // Автоматическая сварка. 2012. №. 4. С. 8–14.

2. Овчинников В.В., Грушко О.Е., Алексеев В.В., Магнитов В.С., Егоров Р.В. Структура и свойства сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, полученных электронно-лучевой сваркой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №. 5. С. 7–11.

3. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M.A. Perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process // Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.

4. Kuper E.A., Logachev P.V., Repkov V. V., Selivanov A. N., Selivanov P. A., Semenov Y. I., Chertovskikh A. S. Automated system for setting the seam coordinates in electron-beam welding facilities // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 45–50.

5. Borovik V., Shatravin V., Shashev D., Kornilov S., Rempe N., Shidlovskiy S. Industrial robot automation in solving non-vacuum electron-beam welding problems // MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2016, vol. 79, p. 01034.

6. Sizov M.M., Starostenko A.A., Blokhina K.A., Medvedev A.M. FPGA based image processing system for electron beam welding facility // Proceedings of PCaPAC2018, Hsinchu, Taiwan, 2018.

7. Koleva E., Dzharov V., Kardjiev M., Mladenov G. Automation of the electron-beam welding process // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2016, vol. 700, no. 1, p. 012012.

8. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Murygin A.V., Tynchenko Y. A. Energy distribution modelling in the weld zone for various electron beam current values in COMSOL Multiphysics // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021, vol. 1889, no. 4, p. 042058.

9. Kurashkin S., Rogova D., Tynchenko V., Petrenko V., Milov A. Modeling of Product Heating at the Stage of Beam Input in the Process of Electron Beam Welding Using the COMSOL Multiphysics System // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. — Springer, Cham, 2020, pp. 905–912.

10. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Y. The model of formation of a non-self-sustained discharge in the plasma in electron beam welding // Welding international, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 493–497.

11. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Теория сварочных процессов // М.: Машиностроение. — 1978. — 239 с.

12. Dhinakaran V., Khope S., Shanmugam N.S., Sankaranarayanan K. Numerical prediction of weld bead geometry in plasma arc welding of titanium sheets using COMSOL // Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Bangalore. — Bangalore, India : COMSOL, 2014, pp. 13–14.

13. Sharma P., Chandra L., Ghoshdastidar P.S., Shekhar R. A novel approach for modelling fluid flow and heat transfer in an Open Volumetric Air Receiver using ANSYS-FLUENT // Solar energy, 2020, vol. 204, pp. 246–255.

14. Murygin A.V., Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Rogova, D. V. The use of ANSYS for modelling the energy distribution in steady mode with electron beam welding // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021, vol. 1889, no. 4, p. 042061.

15. Wang D.S., Yue L.Y., Yang H., Zhang P.P. Computational analysis of laser cladding of preset MCrAlY coating based on ANSYS I-Temperature field // Materials Science Forum. — Trans Tech Publications Ltd, 2021, vol. 1020, pp. 139–147.

16. Kurashkin S.O., Seregin Y.N., Tynchenko V.S., Petrenko V. E., Murygin A. V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020, vol. 1515, no. 5, p. 052049.

17. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Petrenko V.E., Milov A.V., Murygin A.V. Mathematical models of beam input and output in the process of electron beam welding of thin-walled structures // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020, vol. 1515, no. 5, p. 052048.

18. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Murygin A.V., Kukartsev V.V., Tynchenko V.V. The model of energy distribution during electron beam input in welding process // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020, vol. 1679, no. 4, p. 042036.

19. Kurashkin S., Tynchenko V., Murygin A., Rogova D., Bocharov A. Modelling the heating of thin-walled aerospace designs from various materials with electron beam welding // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing LLC, 2021, vol. 2402, no. 1, p. 020048.

References

1. Ternovoy E.G., Bondarev A.A. Electron-beam welding of thick-walled shells made of aluminum alloys AMG6 and M40. *Automatic welding*, 2012, no. 4, pp. 8–14.

2. Ovchinnikov V.V., Grushko O.E., Alekseev V.V., Magnitov V.S., Egorov R.V. Structure and properties of welded joints of aluminum alloy V-1469 obtained by electron beam welding. *Procurement production in mechanical engineering*, 2012, no. 5, pp. 7–11.

3. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar, M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process // Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817.

4. Kuper E.A., Logachev P.V., Repkov V.V., Selivanov A.N., Selivanov P.A., Semenov Y.I., Chertovskikh A.S. Automated system for setting the seam coordinates in electron-beam welding facilities // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 45–50.
5. Borovik V., Shatravin V., Shashev D., Kornilov S., Rempe N., Shidlovskiy S. Industrial robot automation in solving non-vacuum electron-beam welding problems // *MATEC Web of Conferences*. — EDP Sciences, 2016, vol. 79, p. 01034.
6. Sizov M.M., Starostenko A.A., Blokhina K.A., Medvedev A.M. FPGA based image processing system for electron beam welding facility // *Proceedings of PCaPAC2018*, Hsinchu, Taiwan, 2018.
7. Koleva E., Dzharov V., Kardjiev M., Mladenov G. Automation of the electron-beam welding process // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2016, vol. 700, no. 1, p. 012012.
8. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Murygin A.V., Tynchenko Y.A. Energy distribution modelling in the weld zone for various electron beam current values in COMSOL Multiphysics // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021, vol. 1889, no. 4, p. 042058.
9. Kurashkin S., Rogova D., Tynchenko V., Petrenko V., Milov A. Modeling of Product Heating at the Stage of Beam Input in the Process of Electron Beam Welding Using the COMSOL Multiphysics System // *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. — Springer, Cham, 2020, pp. 905–912.
10. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Y. The model of formation of a non-self-sustained discharge in the plasma in electron beam welding // *Welding international*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 493–497.
11. Rykalin N.N., Zuev I. V., Uglov A.A. Fundamentals of electron beam processing of materials. *Mechanical Engineering*, 1978, p. 239.
12. Dhinakaran V., Khope S., Shanmugam N.S., Sankaranarayanan K. Numerical prediction of weld bead geometry in plasma arc welding of titanium sheets using COMSOL // *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Bangalore*. — Bangalore, India : COMSOL, 2014, pp. 13–14.
13. Sharma P., Chandra L., Ghoshdastidar P.S., Shekhar R. A novel approach for modelling fluid flow and heat transfer in an Open Volumetric Air Receiver using ANSYS-FLUENT // *Solar energy*, 2020, vol. 204, pp. 246–255.
14. Murygin A.V., Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Rogova, D. V. The use of ANSYS for modelling the energy distribution in steady mode with electron beam welding // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021, vol. 1889, no. 4, p. 042061.
15. Wang D.S., Yue L.Y., Yang H., Zhang P.P. Computational analysis of laser cladding of preset MCrAlY coating based on ANSYS I-Temperature field // *Materials Science Forum*. — Trans Tech Publications Ltd, 2021, vol. 1020, pp. 139–147.
16. Kurashkin S.O., Seregin Y.N., Tynchenko V.S., Petrenko V. E., Murygin A. V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2020, vol. 1515, no. 5, p. 052049.
17. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Petrenko V. E., Milov A.V., Murygin A.V. Mathematical models of beam input and output in the process of electron beam welding of thin-walled structures // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2020, vol. 1515, no. 5, p. 052048.
18. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Murygin A.V., Kukartsev V.V., Tynchenko V.V. The model of energy distribution during electron beam input in welding process // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2020, vol. 1679, no. 4, p. 042036.
19. Kurashkin S., Tynchenko V., Murygin A., Rogova D., Bocharov A. Modelling the heating of thin-walled aerospace designs from various materials with electron beam welding // *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing LLC, 2021, vol. 2402, no. 1, p. 020048.

Тынченко Вадим Сергеевич — канд. техн. наук, доц. кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
vadamond@mail.ru

Курашкин Сергей Олегович — аспирант кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
scorpion_ser@mail.ru

Tynchenko Vadim Sergeevich — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Information-Control Systems” of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
vadamond@mail.ru

Kurashkin Sergei Olegovich — postgraduate student at the department of “Information-Control Systems” of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
scorpion_ser@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.021

Ю.В. Подураев, М.М. Стебулянин, Д.Д. Климов, А. Жохара
Y.V. Poduraev, M.M. Stebulyanin, D.D. Klimov, A. Johara

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ СМЕНЫ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЭКЗОСКЕЛЕТА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ROS

ALGORITHM FOR AUTOMATING THE MOVEMENT MODE CHANGE OF A LOWER LIMB REHABILITATION EXOSKELETON USING ROBOTIC OPERATING SYSTEM

Внедрение сервисных роботизированных комплексов во всем мире является приоритетным направлением моторной реабилитации больных с поражением центральной нервной системы. Особенно широко используются роботы-экзоскелеты для реабилитации нижних конечностей, которые дают возможность восстановить способность передвигаться людям с парализацией из-за травмы спинного мозга.

Экзоскелеты обычно выполняют заранее запрограммированные движения, инициируемые переключателями или датчиками. Пользователи (далее — Пилоты) могут осуществлять только ограниченный контроль траектории движения ног и скоростью ходьбы, чтобы избежать препятствий. В этой статье представлено моделирование движения экзоскелета для реабилитации нижних конечностей с использованием операционной системы ROS.

С помощью симулятора Gazebo модель экзоскелета описывается с использованием языка программирования Extensible Markup Language (XML) в формате Unified Robot Description Format (URDF). Кроме того, в данной работе предлагается специальный алгоритм для автоматизации смены режима движения экзоскелета в зависимости от показаний внешнего информационного устройства.

The introduction of high-tech robotic complexes operating in biofeedback is a priority in the motor rehabilitation of patients with lesions of the central nervous system all over the world, especially the exoskeleton robots for the lower limbs which offer the potential to restore ambulation to individuals with paraplegia due to spinal cord injury.

However, exoskeletons often rely on preprogrammed gait, initiated by switches, sensors, and/or EEG triggers. Users (pilots) can exercise only limited independent control over the trajectory of the feet, the speed of walking, and the placement of feet to avoid obstacles. In this paper, the simulation of the movement of the exoskeleton lower limbs for rehabilitation using the Robot Operating System (ROS) is presented.

Using Gazebo, the model of the exoskeleton is described using Extensible Markup Language (XML) programming in the Unified Robot Description Format (URDF). More over, this work proposes a special algorithm to automate the change mode of the movement of the exoskeleton depending on an external sensor.

Ключевые слова: ROS, моделирование, Gazebo, экзоскелет нижних конечностей, реабилитационная робототехника, XML.

Keywords: Robot Operating System (ROS), simulation, Gazebo, lower limbs exoskeleton rehabilitation robotics, Extensible Markup Language (XML).

Введение

В данной работе мы будем использовать операционную систему ROS и симулятор Gazebo для построения модели экзоскелета для реабилитации нижних конечностей, который перемещается и взаимодействует с объектами по аналогии с «умным

домом», в зависимости от данных внешнего информационного устройства. Цель предлагаемой системы — заменить стандартное ручное управление движением пилотом, который обычно использует для этого кнопки на ручках экзоскелета, на автоматизированный режим перемещения экзоскелета для типовых движений.

Актуальность и практическая полезность автоматизации смены режима движения экзоскелета нижних конечностей

Актуальность и практическая полезность автоматизации смены режима движения рассматриваемого вида экзоскелета определяется тремя основными факторами:

- повышение эффективности и надежности использования экзоскелета нижних конечностей;
- улучшение психологического состояния пилота в процессе движения при реабилитации;
- экономическая целесообразность.

В случае обычного ручного управления пилот должен удерживать равновесие и вынужден останавливать движение для смены режима движения. Для этого используется набор кнопок на ручках экзоскелета или специальные часы, которые подключены к с помощью Bluetooth-соединения. Данный вариант неудобен, особенно когда пилот должен изменять режимы движения для обхода препятствия. Автоматизированная смена режима движения позволяет выполнять такие перемещения быстрее и надежнее.

Как следствие, это улучшает и психологическое состояние пилота при использовании экзоскелета. Некоторые люди смущаются, когда останавливаются, и не могут двигаться, но с помощью автоматизированной системы они чувствуют себя более уверенно.

Пилот может арендовать экзоскелет на определенный срок вместо того, чтобы покупать устройство или использовать его только в больнице, он может взять его в аренду и использовать дома. А за счет автоматизации смены режима движения экзоскелета внутри дома пилот увеличит активное время его использования, что сделает процесс реабилитации более эффективным и, как следствие, сэкономит деньги и время.

Построение модели экзоскелета реабилитации нижних конечностей

Сначала мы спроектируем модель экзоскелета, определив необходимые шарниры и звенья (основные компоненты модели робота), а также модель «умного дома», содержащую препятствия. Затем мы вводим в модель внешнее информационное устройство — специальный тип датчика LiDAR (HOKUYO).

Чтобы управлять движением шарниров, была написана управляющая программа (специальный «узел» [1]) на языке программирования Python [2], чтобы представить все 5 типовых режимов движения реабилитационного экзоскелета нижних конечностей: движение прямо — переход в положение сидя — переход в положение стоя — подъем по лестнице — спуск по лестнице [3].

По сигналу датчика LiDAR экзоскелет может определить тип следующего препятствия и определять необходимый режим движения для обхода этого препятствия.

Симуляция содержит модель экзоскелета в виде мобильного робота, который взаимодействует со виртуальным миром, представляющим собой «умный дом» (рис. 1).

Чтобы спроектировать модель, должен быть определен файл (.xacro) с использованием языка XML, который представляет форму и компоненты модели, дом с препятствиями и датчик LiDAR.

Модель любого робота, представленного в ROS и Gazebo, с указанием его звеньев, шарниров, соединяющих эти звенья, и трансмиссии, которая описывает отношения между исполнительным механизмом и шарниром. Модель экзоскелета (рис. 2) построена по 7 звеньям [4–6]:

- 1 — waist_link как талия экзоскелета;
- 2 — RU_link как правое бедро экзоскелета;
- 3 — LU_link как левое бедро экзоскелета;
- 4 — RD_link как правая ножка экзоскелета;

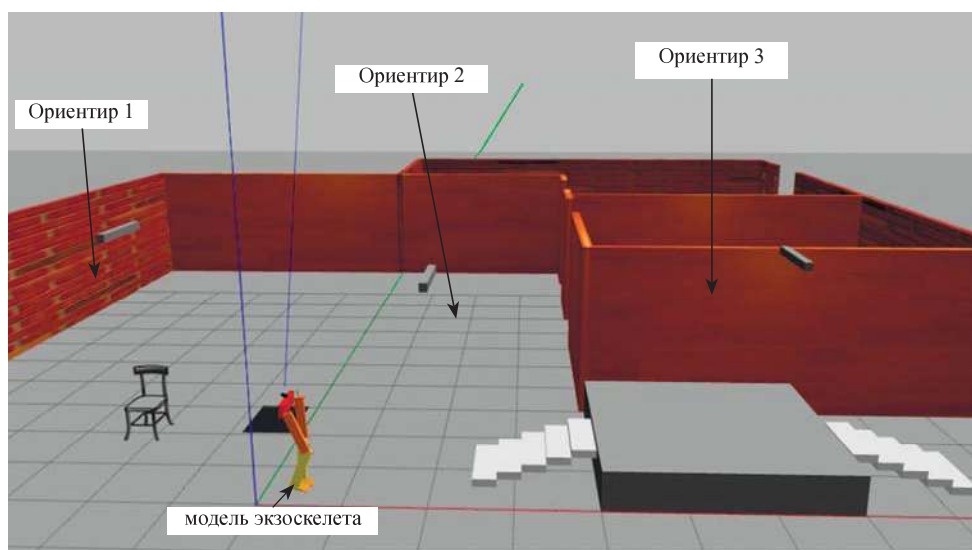


Рис. 1. Модель экзоскелета взаимодействует со сконструированным миром

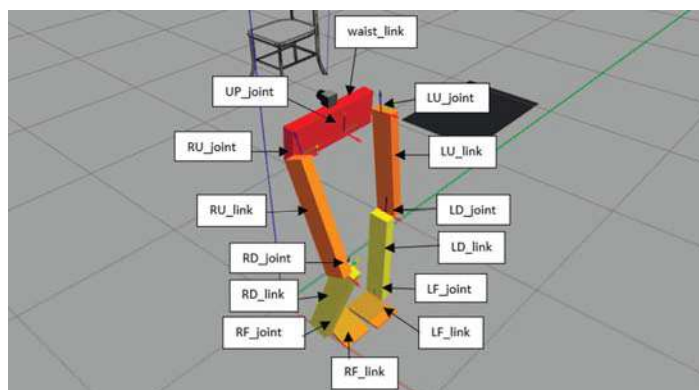


Рис. 2. Шарниры и звенья модели реабилитационного экзоскелета нижней конечности

5 — LD_link как левая ножка экзоскелета;

6 — RF_link как правая ступня экзоскелета;

7 — LF_link как левая ступня экзоскелета.

И 7 шарниров [4, 5]:

1 — RU_joint: соединение между waist_link и RU_link (поворотный шарнир);

2 — LU_joint: соединение между waist_link и LU_link (поворотный шарнир);

3 — RD_joint: соединение между RU_link и RD_link (поворотный шарнир);

4 — LD_joint: соединение между LU_link и LD_link (поворотный шарнир);

5 — RF_joint: соединение между RD_link и RF_link (фиксированный шарнир);

6 — LF_joint: соединение между LD_link и LF_link (фиксированный шарнир).

7 — UP_joint: дополнительный шарнир, который дает возможность перемещать модель по оси Z (призматический шарнир).

Кроме того, существуют виртуальные звенья и шарниры, необходимые для плагина (libgazebo_ros_control), предоставляемый Gazebo, дающий модели возможность перемещаться по оси X и оси Y в линейном и угловом направлениях. Мы можем контролировать движение модели в этих направлениях с помощью клавиатуры компьютера.

Также были добавлены ориентиры над всеми препятствиями, которые пилоту необходимо преодолеть. Например, добавили ориентир 1 над сидением, на котором пилот будет сидеть в экзоскелете, ориентир 2 над начальной точкой подъема по лестнице, и ориентир 3 над начальной точкой спуска по лестнице как показано на рисунке 1, где расстояние между ориентиром и датчиком отличается от одного препятствия к другому.

На основе сигнала датчика, определяющего расстояние между экзоскелетом и препятствием, можно определить тип препятствия, с которым столкнется пилот, и подходящую систему движения экзоскелета.

Место или помещение, в котором будет ходить пилот с экзоскелетом, оборудовано этими препятствиями с соответствующими ориентирами, которые устанавливаются в потолке помещения на заданной высоте.

Что касается используемого датчика, то это датчик LiDAR (HOKUYO), который используется для обнаружения препятствий и определения расстояния между датчиком и препятствием при помощи лазерного луча. Датчик направлен в направлении оси Z (что ориентиры, используемые для расчета расстояния между ним и датчиком, расположены непосредственно над экзоскелетом). Обычно дальность обнаружения LiDAR (HOKUYO) составляет 180 градусов, но в модели требуемый процесс обнаружения происходит только горизонтально и непосредственно над моделью, и поэтому нам нужен только один лазерный луч от датчика, чтобы считать расстояние между датчиком и ориентиром (все параметры датчика можно редактировать через плагин файла LiDAR (HOKUYO)).

Этот тип датчика был выбран из-за его простоты применения и обращения в рабочей среде ROS и Gazebo, а с другой стороны, он выдерживает удары и вибрации, что важно, так как проектируемая модель представляет собой двуногого робота [5].

Алгоритм управления моделью экзоскелета для реабилитации нижних конечностей

После построения модели с использованием файла XML мы можем определить файл Python (.py) и написать алгоритм управления моделью и взаимодействия с окружающими объектами.

Чтобы управлять любым шарниром, мы должны приложить необходимое усилие к трансмиссии. Имеется 4 трансмиссии [4], по трансмиссии на каждый подвижный шарнир:

1 — tran_RU для управления RU_joint;

2 — tran_LU для управления LU_joint;

3 — tran_RD для управления RD_joint;

4 — tran_LD для управления LD_joint.

Как мы говорили ранее, экзоскелет имеет 5 режимов движения, и по сигналу датчика LiDAR определяет тип следующего препятствия и требуемый режим для преодоления этого препятствия. В зависимости от сигнала от LiDAR, мы можем посылать определенное усилие на каждый шарнир в каждый момент, чтобы имитировать требуемое движение для преодоления определенного препятствия.

Например, после запуска среды ROS и вызова пакета, содержащего все файлы, необходимые для запуска спроектированной модели, движением модели можно управлять.

Когда модель проходит под ориентиром № 2, датчик LiDAR обнаруживает этот ориентир и рассчитывает расстояние между моделью и ориентиром № 2. Соответственно тип препятствия, с которым столкнется пилот, определяется (в данном случае это «подняться по лестнице»). В дополнение к соответствующему режиму движения экзоскелета, рассчитывается амплитуда этого движения, которую необходимо передать каждому шарниру в соответствии с размерами преодолеваемого препятствия.

Заключение

В этом исследовании было представлено автоматизированное изменение режима движения экзоскелета нижних конечностей для реабилитации с использованием внешнего датчика LiDAR.

Модель была определена XML-скриптом и реализована в среде Gazebo. Определены требуемые траектории для каждого шарнира в зависимости от сигнала датчика и определенного препятствия, которое должна обходить модель.

Кроме того, симуляция Gazebo полезна для визуализации движения прототипа экзоскелета. В заключение можно сказать, что новая модель, смоделированная в Gazebo, может подойти для создания устройства для тренировки ходьбы.

Подураев Юрий Викторович — д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

y.poduraev@stankin.ru

Стебулянин Михаил Михайлович — д-р техн. наук, доц., директор института производственных технологий и инжиниринга ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

mmsteb@rambler.ru

Климов Даниил Дмитриевич — канд. техн. наук, доц. кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

daniil.klimov@gmail.com

Жохара Ахмад — аспирант, ассистент кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Ahmad.johara.89@gmail.com

Poduraev Yuriy Viktorovich — D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Robotics and Mechatronics” of MSUT “STANKIN”

y.poduraev@stankin.ru

Stebulyanin Mikhail Mikhailovich — D.Sc. of Engineering, associate professor, Director of the Institute of Production Technologies and Engineering of MSUT “STANKIN”

mmsteb@rambler.ru

Klimov Daniil Dmitrievich — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Robotics and Mechatronics” of MSUT “STANKIN”

daniil.klimov@gmail.com

Johara Ahmad — postgraduate student, assistant teacher at the sub-department of “Robotics and Mechatronics” of MSUT “STANKIN”

Ahmad.johara.89@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Балакина Е.С. Интеграция робототехнической ОС (ROS) с кибернетическим контроллером ТРИК // Санкт-Петербургский государственный университет, 2019. — 23 с.

2. Лентин Д. Изучение робототехники с помощью PYTHON // пер. с англ. А.В. Корягина. — М.: ДМК Пресс, 2019, 250 с.

3. Котов С.В., Исакова Е.В., Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Лиждвой В.Ю., Секирин А.Б. Методика проведения тренировок пациентов после острого нарушения мозгового кровообращения с использованием медицинского тренажера EchoAtlet // ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского. № 3, 2020, 91 с.

4. Mohammad S.A., Rizauddin R., MohdAizat A.T., Mohd F.I, Khashayar D.N. Simulation and Control of a Six Degree of Freedom Lower Limb Exoskeleton // Jurnal Kejuruteraan, № 32(2), 2020, с. 197–204.

5. ГОСТ Р 60.0.0.4 — 2018 / ИСО 8373:2012. Роботы и робототехнические устройства термины и определения. — Национальный стандарт РФ, 2018, 42 с.

6. Иванов А.А. Основы робототехники: учеб. пособие для студентов вузов. / А.А. Иванов. — М.: Форум, 2012, 222 с.

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДОВЕРЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

COMPLEX SYNTHESIS METHODOLOGY OF HIGH-SPEED TRUSTED INDUSTRIAL MOTION CONTROL SYSTEMS OF ROBOTS AND MECHATRONIC SYSTEMS

Часть II. Методологии синтеза подсистем доверенной память-центрической системы управления движением*

Part II. Methodology of synthesis of subsystems of a trusted memory-centric motion control system

Исследуется проблема синтеза подсистем управления движением реального времени промышленных роботов и мехатронных систем. Для ряда подсистем управления (относящихся к интеллектуальному и исполнительному блоку) специфика память-центрической архитектуры ставит задачу или открывает возможности разработки или применения новых, более эффективных математических моделей. Синтез подсистем интеллектуального блока и связанных с ним подсистем блока осязания соответствует решению прямой (проектной) задачи, т.е. заключается в определении составляющих элементов (подсистем), обеспечивающих заданные параметры системы управления (функционального блока). Методология синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу, в результате которого определяется структура объекта и находятся значения параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (технического задания).

The problem of synthesis of real-time motion control subsystems of industrial robots and mechatronic systems is investigated. For a number of control subsystems (related to the intelligent and executive unit), the specifics of the memory-centric architecture poses a task or opens up opportunities for the development or application of new, more efficient mathematical models. The synthesis of the subsystems of the intelligent block and the related subsystems of the sensing block corresponds to the solution of a direct (project) task, i.e. it consists in determining the constituent elements (subsystems) that provide the specified parameters of the control system (functional unit). The methodology of synthesis of subsystems of the executive unit of a trusted real-time control system corresponds to structural-parametric or parametric synthesis, as a result of which the structure of the object is determined and the values of the parameters of its constituent elements are found in such a way that the conditions of the synthesis task (technical task) are satisfied.

Ключевые слова: методология, синтез, управление движением, промышленный робот, мехатронная система, интеллектуализация, исполнительный блок.

Keywords: methodology, synthesis, motion control, industrial robot, mechatronic system, intellectualization, executive unit.

Введение

После определения в качестве оптимальной память-центрической архитектуры системы управления движением в реальном времени необходимо выполнение синтеза подсистем, образующих систему управления, т.е. разработка математических моделей для подсистем управления и определение их практической реализации в виде функциональных блоков, модулей,

элементов, наилучшим образом обеспечивающих функциональность системы управления.

Комплекс требований к конечному результату синтеза системы управления и к промежуточным результатам (на этапе определения архитектуры или этапе синтеза подсистем управления движением) неизменны. Это функциональность, реализуемость и доверие.

Составляющие функциональности системы управления известны [1]: полнота, конфигурируемость и гибкость.

* Часть 1. Модели решения проблемы и комплексная методология синтеза систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем см. в № 2 (61), 2022.

Функциональность системы управления также определяется как комплектность реализации функций, заданных в проблеме синтеза системы управления.

Реализуемость — понятие, которое определяет возможность практического обеспечения функциональных свойств имеющимися техническими средствами. Условие реализуемости управления движением формулируется в терминах длительности цикла управления, сложности объекта управления и быстродействия системы управления.

Доверие (уровень доверия) к системе управления [2] — степень уверенности в надежном функционировании системы управления в заданных условиях, зависящая от функциональной надежности и информационной безопасности.

На этапе синтеза подсистем управления к комплексу требований добавляется архитектурное ограничение: структурные элементы должны соответствовать выбранной памяти-центрической архитектуре системы управления. Следовательно, синтез подсистем управления движением реального времени должен базироваться на блоках и функциональных модулях, определенных в концептуальной модели системы управления движением в реальном времени с память-центрической архитектурой. Согласно сформированной концептуальной модели [3] имеются следующие функциональные блоки: ядро, исполнительный блок (образованный модулями интерполяции, разгона-торможения, эквидистантной коррекции, предварительного просмотра, трансформации и др.), интеллектуальный блок (в который входит человеко-машинный интерфейс и комплекс модулей на базе искусственной нейронной сети), блок оцувствления (различные модули оцувствления и преобразователи сигналов), а также коммуникационная сеть и общая память.

Для части подсистем, работа которых происходит без жесткой привязки к реальному времени и не требует обработки больших объемов данных, для которых не предполагается разработка или использование оригинальных математических моделей, системные и технические требования к реализации формулируются уже на этапе определения архитектуры системы управления. К числу таких подсистем относятся ядро системы управления, а также общая память и коммуникационная сеть.

Для ряда подсистем управления специфика памяти-центрической архитектуры ставит задачу или открывает возможности разработки или применения новых, более эффективных математических моделей. К числу таких подсистем управления, требующих разработки или применения новых математических моделей, относятся функциональные модули, управление которыми связано со значительным объемом вычислений и осуществляется в реальном времени. Это модули исполнительного блока (кроме регуляторов исполнительных устройств, для которых характерен минимальный объем выполняемых вычислений), а также все модули интеллектуального блока.

Методология синтеза подсистем интеллектуального блока доверенной системы управления движением

Подсистемы интеллектуального блока доверенной системы управления реального времени являются инструментарием решения комплексной проблемы интеллектуализации управления. Группы задач, формирующих эту комплексную проблему, определяются приоритетами технологического развития в условиях 4-ой промышленной революции, а также имеющимися ограничениями, связанными с уровнем технологического развития страны и спецификой ее внешнеэкономического и геополитического положения. Указанные технологические ограничения связаны с имеющимся отставанием страны в отдельных сегментах полупроводниковой промышленности, что обуславливает меньший арсенал средств для достижения поставленных целей по управлению движением. Специфика внешнеэкономического и геополитического положения России заключается в наличии ограничений в обеспечении имеющихся потребностей в высокотехнологичной быстродействующей электронно-компонентной базе за счет импорта из недружественных стран — лидеров в области полупроводниковой промышленности и производстве оборудования для изготовления полупроводников.

Под интеллектуальностью искусственной системы понимают [4, 5] ее автономность и адаптивность. Высокая степень автономности работы искусственной системы позволяет ей самостоятельно принимать решения в рамках своей функциональности. Возможность адаптации к изменяющимся условиям внешней среды при эксплуатации или изменяющимся условиям самой эксплуатации позволяет искусственной системе обучаться и продолжать функционировать. Под интеллектуализацией понимается процесс повышения степени интеллектуальности технической системы.

К числу наиболее значимых групп задач интеллектуализации управления, которые необходимо решать для повышения качества управления, относятся:

1. Повышение производительности объектов управления (промышленных роботов, станков и других мехатронных систем) за счет интеллектуализации подготовки производства. На практике это представляет собой включение в состав интеллектуального блока необходимых подсистем (на базе искусственных нейронных сетей), управляющих позиционированием, установкой, межоперационными перемещениями и др. операциями подготовки производства с высоким быстродействием и без участия или с минимальным участием человека. Одной из наиболее востребованных задач в данной группе является задача привязки базисных систем координат на основе технического зрения [6].

Следует отметить, что потенциал роста производительности объектов управления за счет интеллектуализации управления технологических операций обработки или рабочих перемещений существенно меньше, чем в случае подготовки производства. Это связано с тем, что скорости обработки и рабочих перемещений ограничены не быстродействием управления, а технологическими возможностями (скоростью резания, деформации обрабатываемого изделия, инерционностью объекта управления и др.).

2. Реализация управления на основе обработки больших объемов данных измерений состояния управляемого объекта: положения, скорости, температуры и др. Частными задачами, относящимися к данной группе, являются задача мультиспектральной обработки и анализа характеристик одномерных данных с датчиков и сенсоров, а также задача комплексирования/слияния разнородных данных [7, 8].

3. Повышение качества человеко-машинного взаимодействия, т.е. повышение скорости работы человека-оператора, снижение количества ошибок, повышение скорости обучения и улучшение условий работы оператора. Одной из частных задач, которые должны решаться в интеллектуальной системе управления, является управление коллаборативными робототехническими комплексами на основе методов бесконтактного распознавания действий человека [9–11].

4. Реализация адаптивности в процессе управления движением исходя из текущего положения и скорости рабочего органа или при решении транспортной задачи при перемещении мехатронной системы в вариативном окружении цеха, закрытого помещения или на открытых пространствах. Частной задачей, относящейся к данной группе, является задача интеллектуального планирования траектории движения исполнительных механизмов робототехнических и мехатронных систем в результате восстановления трехмерных сцен (на основе SLAM и др.) [12, 13].

5. Расширение функциональности и качества бесконтактных измерений и других технологий неразрушающего контроля физических объектов на основе интеллектуализации измерений. На практике интеллектуализация измерений означает применение искусственных нейронных сетей с глубинным машинным обучением, способных в реальном времени осуществлять контроль положения, скорости и других параметров физического объекта без внесения изменений в его состояние. Частной задачей, имеющей существенную практическую значимость, является задача контроля качества сварных швов и соединений методами неразрушающего контроля на основе глубинного обучения [14].

Указанные выше группы задач интеллектуализации управления хорошо коррелируются с технологическими приоритетами, формирующимися или приобретающими

доминирующее значение в условиях 4-ой промышленной революции. К числу особенностей, определяющих функционирование экономики в условиях 4-ой промышленной революции, следует отнести:

1. Персонализацию потребления, связанную с переориентацией производства на единичное и мелкосерийное производство, требующую радикального сокращения времени подготовки производства. Это может быть достигнуто несколькими способами, которые могут использоваться как по отдельности, так и комплексно, в том числе: за счет интеллектуализации подготовки производства; на основе перехода к использованию немеханических, малоинерционных, бесконтактных и неразрушающих рабочих, измерительных и энергетических машин и их компонентов.

2. Автоматизацию и роботизацию в направлении создания безлюдного производства. Основой для реализации безлюдного производства является интеллектуализация систем управления, т.е. наделение их адаптивностью и автономностью. Роботизация и автоматизация производства требует развития коллаборативных технологий и других технологий человеко-машинного интерфейса, обеспечивающих повышение эффективности взаимодействия человека-оператора с интеллектуальными системами управления.

3. Работу с большими данными, несистематизированными, неполными и разнородными. Для выполнения таких работ в реальном времени необходимо использовать искусственные нейронные сети, строя на их основе системы машинного обучения и более сложные системы искусственного интеллекта.

На рисунке 1 приведена схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока оучувствления, соответствующая решению прямой (проектной) задачи. Применительно к синтезу системы управления (функционального блока в составе системы управления) прямая задача означает определение составляющих элементов (подсистем), обеспечивающих заданные параметры системы управления (функционального блока).

Алгоритм синтеза подсистем интеллектуального блока выглядит следующим образом:

1. Формулирование комплексной проблемы интеллектуализации управления движением в реальном времени исходя из актуальных тенденций развития производства и приоритетов научно-технологического развития России [15] в условиях 4-ой промышленной революции и реализующейся в ее рамках цифровизации производства, а также значимых проблем реализуемости управления (в частности, в контексте задач повышения быстродействия для управления в реальном времени).

2. Определение групп задач, в совокупности соответствующих комплексной проблеме интеллектуализации управления движением в реальном времени.

3. Формирование репрезентативной выборки частных задач интеллектуализации управления, охватывающей все группы задач, определенные п. 2.

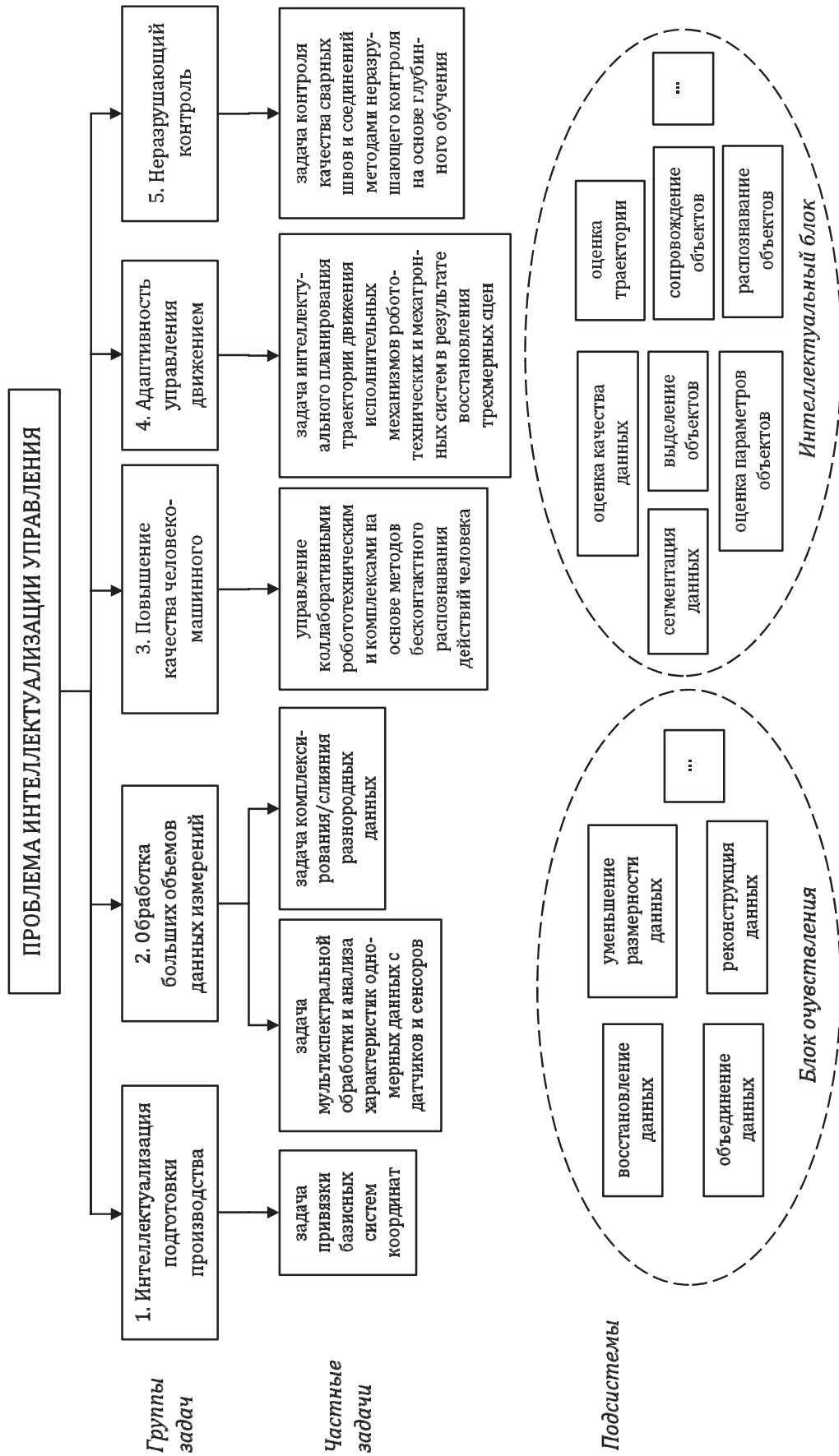


Рис. 1. Схема синтеза подсистем интеллектуального блока и блока очувствления

4. Решение сформулированных частных задач и определение в результате этого решения совокупности подсистем, необходимых для всех рассматриваемых частных задач. Этот набор подсистем интеллектуального блока, а также блока очувствления (в части подсистем, связанных с интеллектуальным блоком), является базовым для решения комплексной проблемы интеллектуализации управления движением в реальном времени. Расширение, детализация или уточнение набора подсистем — экспертная задача, которая решается по мере накопления опыта синтеза систем управления движением с различными задачами, формируемыми для интеллектуального блока.

Методология синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления движением

Методология синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу. Структурно-параметрический синтез — это процесс, в результате которого определяется структура объекта и находят значения параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (технического задания) [16]. Отличие параметрического синтеза от структурно-параметрического заключается в том, что для него структура модели фиксирована и не изменяется в процессе синтеза. В результате изменяются только параметры и поиск в процессе синтеза осуществляется в пространстве параметров.

Применительно к синтезу исполнительного блока в составе системы управления структурно-параметрический синтез означает, что осуществляется уточнение структуры (набора подсистем — функциональных модулей из числа доступных для использования), а также определяются параметры подсистем, необходимые для реализации заданных функциональных свойств. Для решения типовых задач синтеза, когда совокупность подсистем уже известна, задача синтеза упрощается и может использоваться параметрический синтез, заключающийся в определении параметров подсистем (номенклатура параметров, диапазоны изменений, задержки, протоколы обмена данными и т.д.).

Ключевой составляющей методологии структурно-параметрического и параметрического синтеза является определение необходимого и достаточного комплекса подсистем, из которых будет формироваться («собираться») исполнительный блок.

Для формирования указанного комплекса подсистем следует использовать подход, включающий в себя две взаимодополняющих составляющие:

1. Структурный анализ существующих промышленных роботов, станков и других мехатронных систем с целью выявления ограниченного комплекса подси-

стем (функциональных модулей), из которых формируются исполнительные блоки их системы управления.

Анализ существующих промышленных роботов, станков и других мехатронных систем [17–23] показывает, что в исполнительном блоке системы управления обычно присутствуют следующие подсистемы (функциональные модули): интерполятор, модуль разгона-торможения, модуль эквидистантной коррекции, модуль предварительного просмотра, модуль трансформации, регуляторы исполнительных устройств, а также модуль безопасности.

2. Определение совокупности функций и задач управления, реализуемых подсистемами (функциональными модулями), обеспечивающий требуемые функциональные свойства исполнительного блока систем управления для максимально широкой номенклатуры задач синтеза.

Важнейшей функцией системы управления движением, непосредственно влияющей на качество формообразования на обрабатывающих станках или точность воспроизводства перемещения в промышленном роботе, является обработка траектории рабочего органа на основе информации, заданной в управляющей программе.

Стандартный набор задач подготовки данных, решаемых системой управления, включает [18]: приведение координат узловых точек траектории из текущей локальной системы координат в систему координат осей оборудования (робота, станка и др.), преобразование единиц измерения, пересчет относительных размеров в абсолютные; расчет параметров линейной, круговой (винтовой) интерполяции или интерполяции сплайнами; построение эквидистантных траекторий для коррекции длины и радиуса обрабатывающего инструмента; предпросмотр траектории для поиска изломов и расчета допустимой скорости движения; расчет участков разгона-торможения.

Наряду с задачами подготовки данных функциональное назначение исполнительного блока также включает управление внешними устройствами (в частности, приводами).

Приведенный выше комплекс функций и задач управления для исполнительного блока может быть реализован соответствующими подсистемами. При этом часть функций и задач управления могут быть объединены в рамках одной подсистем. К числу подсистем исполнительного блока, обеспечивающих необходимый набор функций управления, в частности, относятся: параметрическая интерполяционная подсистема геометрического сглаживания сквозной системы планирования непрерывной траектории перемещения; динамический модуль, реализующий двунаправленный алгоритм сканирования, объединяющий функцию управления разгоном/торможением и функцию предварительного просмотра; параметрическая интерполяционная подсистема реального времени; подсистемы прямых и обратных кинематических преобразований и др.

Выводы

На основании проведенного в статье анализа можно сделать следующие выводы:

1. Алгоритм синтеза подсистем интеллектуального блока включает в себя: формулирование комплексной проблемы интеллектуализации управления движением в реальном времени исходя из актуальных тенденций развития производств; определение групп задач, в совокупности соответствующих комплексной проблеме интеллектуализации управления движением в реальном времени; формирование репрезентативной выборки частных задач интеллектуализации управления; решение сформулированных частных задач и определение в результате этого решения совокупности подсистем, необходимых для всех рассматриваемых частных задач.

2. Методология синтеза подсистем исполнительного блока доверенной системы управления реального времени соответствует структурно-параметрическому или параметрическому синтезу, в результате которого определяется структура объекта и находятся значения параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (технического задания).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (FSFS-2021-0004).

Библиографический список

1. ГОСТ Р МЭК 61069-3-2017. Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. определение свойств системы с целью ее оценки. Часть 3 — Оценка функциональности системы

2. Zelensky A.A., Morozkin M.S., Panfilov A.N., Kuptsov V.R., Gribov A.A. Ensuring confidence in control systems of technological equipment / Computing, Telecommunications and Control. 2021. Т. 14. № 4. С. 71–83.

3. Зеленский А.А., Илюхин Ю.В., Грибов А.А. Память-центрические модели систем управления движением промышленных роботов / Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 245–256

4. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.) // Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2010.

5. Душкин Р.В. — Интеллектуализация управления техническими системами в рамках функционального подхода // Программные системы и вычислительные методы. — 2019. — №2. С 43–57. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29192

6. Зеленский А.А., Франц В.А., Семенищев Е.А. Алгоритм планирования траектории рабочего органа манипулятора для привязки базисных систем координат с использованием технического зрения // Вестник машиностроения. — 2019. — № 10. — С. 3–7.

7. Зеленский А.А., Франц В.А. Генеративные состязательные нейронные сети для дескрипторного описания видеоизображений в задаче оценки визуального качества // Вестник МГТУ «Станкин». — 2018. — № 3 (46). — С. 86–90

8. Зеленский А.А., Семенищев Е.А., Франц В.А. Алгоритм определения формы объектов по анализу изображений, полученных в инфракрасном диапазоне // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2018. — Т. 21. — № 3. — С. 63–68

9. Зеленский А.А., Письменкова М.М., Воронин В.В. Метод управления коллаборативными робототехническими комплексами и гибкими производственными ячейками на основе построения биомеханической трехмерной модели скелета человека для распознавания действий с использованием технологии глубинного обучения // СТИН. — 2019. — № 7. — С. 15–18

10. Зеленский А.А., Письменкова М.М. Метод распознавания действий человека на сложноструктурированных изображениях и фоне в виде стохастических текстур/ Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2018. — № 3 (46). — С. 116–120

11. Зеленский А.А., Письменкова М.М., Воронин В.В. Алгоритм поиска изображений в виде хэш-функций на основе глубинных нейросетевых технологий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2018. — Т. 21. — № 3. — С. 57–62

12. Зеленский А.А., Гапон Н.В., Жданова М.М., Воронин В.В., Илюхин Ю.В. Метод восстановления карты глубины в задачах управления роботами и мехатронными системами // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2022. — Т. 23. — № 2. — С. 104–112

13. Zelenskii A., Gapon N., Voronin V., Semenishchev E., Serebrenny V., Cen Y. Robot navigation using modified SLAM procedure based on depth image reconstruction // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. — 2021. — V. 11870. — Art. No. 118700H

14. Sizyakin R., Voronin V., Gapon N., Zelensky A., Pizurica A. Automatic detection of welding defects using the convolutional neural network // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. — 2019. — V.11061. — Art. No. 110610E

15. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации // <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>

16. Волков В.А., Чудинов С.М. Системный анализ для структурно-параметрического синтеза // Экономика. Информатика, 2012. № 19 (138). Выпуск 24/1

17. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Илюхин Ю.В., Харьков М.А. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов // СТИН. 2019. № 8. С. 5–8.
18. Suk-Hwan Suh, Seong-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Ian Stroud. Theory and Design of CNC Systems // 2008 Springer. 455 p.
19. Мартинов Л.И., Мартинов Г.М. Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 11. С. 50–55
20. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника // Пер. с англ. М.: Мир, 1989, 624 с.
21. Ruishu Z., Chang Z., Weigang Z. The status and development of industrial robots // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018) 012051. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/423/1/012051/pdf>
22. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 5. С. 30–46. URL: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46>
23. Илюхин Ю.В. Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем управления технологических роботов // Мехатроника. 2000. № 2. С. 7–12.

Зеленский Александр Александрович — канд. техн. наук, директор Института цифровых интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
zelenskyaa@gmail.com

Zelensky Alexander Aleksandrovich — candidate Sc. of Engineering, Director of the Institute of Digital Intelligent Systems of MSUT “STANKIN”
zelenskyaa@gmail.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Conflicts of Interest Statement: The author has no conflicts of interest to declare.

ОБЗОР РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ МЕЖДУ КОЛЛАБОРАТИВНЫМ РОБОТОМ И ЧЕЛОВЕКОМ

REVIEW OF SOLUTIONS IN THE FIELD OF TASK ALLOCATION BETWEEN A COLLABORATIVE ROBOT AND A HUMAN

Представлен обзор существующих методов и алгоритмов распределения задач между человеком и коллаборативными роботами при создании коллаборативных производственных ячеек. Описаны и проанализированы методы распределения, основанные на учете возможностей человека и коллаборативного робота, методы, в основе которых свойства собираемых изделий и рабочего пространства, а также комплексные методы, учитывающие как особенности агентов коллаборативной ячейки, так и весь производственный процесс в целом.

A review of existing methods and algorithms for the allocation of tasks between humans and collaborative robots in the creation of collaborative production cells is presented. Allocation methods based on taking into account the capabilities of a human and a collaborative robot, methods based on the properties of the assembled products and the workspace, as well as complex methods that take into account both the characteristics of the agents of the collaborative cell and the entire production process as a whole are described and analyzed.

Ключевые слова: коллаборативные роботы, распределение задач, совместная работа.

Keywords: collaborative robots, task allocation, collaborative work.

Введение

Объединение когнитивных навыков человека и его ловкости совместно со способностью роботов неутомимо, точно и быстро выполнять требуемые движения, в совокупности с их возможностью к повторяемости производимых действий создало новое направление в робототехнике, получившее название коллаборативная робототехника.

Коллаборативные роботы (коботы), внедренные на производство, позволяют уменьшить нагрузку на человека и повысить производительность труда, что в результате может привести к улучшению качества изготавливаемой продукции.

Как известно, термин «кобот» впервые был использован в работе Пешкина и Колгейта [1] и означал прямое взаимодействие между роботом и человеком в выделенном рабочем пространстве. В наиболее продвинутом варианте кобот — это робот, который способен понимать намерения своего компаньона (коллаборатора) и предсказывать его действия, чтобы соответствующим образом адаптировать свое поведение и оказывать помощь при решении самых разных задач [2].

Интерес разработчиков и исследователей к вопросам построения производственных коллаборативных ячеек достаточно высок. В работе [3] описано взаимодействие робота и человека в процессе совместной оценки полированной детали. Совмест-

ной проверке и паллетированию автомобильных подшипников человеком и роботом посвящена работа [4]. Применение роботов в вышеописанных работах обусловлено постепенным накоплением усталости человека в процессе выполнения однообразных работ. Особо остро это заметно при выполнении сборочных операций. В работе [5] показано повышение производительности и снижение усталости человека при совместной с роботом сборке кабельных систем. Для повышения эргономичности рабочего процесса сборки компонента коробки передач, авторы работы [6] установили робот, помогающий двум сборщикам. В работе [7] описана совместная с роботом сборка двигателей для грузовых автомобилей, обеспечивающая повышение эргономики, гибкости и качества сборки. В работе [8] робот применяется для предсказания поведения человека при разборке системных блоков.

Внедрение коллаборативного робота требует тщательного анализа существующей на производстве ситуации с целью определения рациональности его использования. Результаты проведенного анализа можно использовать для поиска такого распределения обязанностей между коботом и человеком, которое позволит спланировать их работу таким образом, чтобы в перспективе улучшить производственный процесс как по времени, так и по трудозатратам.

В статье речь идет о существующих решениях в вопросе распределения задач между человеком

и роботом в составе коллаборативной производственной ячейки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (FSFS-2021-0004).

Решения, в основе которых возможности человека и робота

Разработке метода распределения задач на основе исследования и описания возможностей человека и робота посвящена работа [9]. Анализ начинается с разбиения технологического процесса сборки на задачи, которые требуется распределить. Затем для каждой задачи определяется, требуется ли для ее выполнения одна из уникальных способностей человека или робота. Если такие задачи имеются, то они однозначно, но субъективно распределяются между человеком и роботом. При этом во внимание принимаются эргономические показатели и характерные особенности выполнения операции. Например, задача установки подшипника в колесо может быть выполнена человеком, однако при рассмотрении характерной особенности, т.е. ее частое выполнение, принимается решение о ее распределении роботу. Остальные задачи оцениваются согласно объективным показателям: времени выполнения, дополнительными инвестициями и качеством выполнения операций. Каждая задача при этом рассматривается с точки зрения нескольких критериев и их характеристик (например, критерий — расположение объектов в рабочей зоне и их характеристик — расположены ли эти объекты упорядочено, неупорядоченно без перекрытия или неупорядоченно с перекрытием).

В работе [10] предложен подход к распределению задач на основе возможностей участвующих в сборочном процессе агентов, особенностей собираемых изделий и учитывающий текущую позу человека в процессе сборки для своевременного перераспределения задач между человеком и роботом с целью уменьшения рабочей нагрузки на человека. Предлагаемая структура системы состоит из четырех модулей: декомпозитора задач, оценщика возможностей, оценщика эргономики и модуля распределения задач. Модуль декомпозиции разбивает все задачи на подзадачи, а те, в свою очередь, на элементарные задачи. Например, задача «Взять и перенести объект» разбивается на подзадачи «Взять» и «Перенести», а задача «Взять» — распадается на элементарные задачи «Переместиться к объекту» и «Схватить объект». При этом каждая элементарная задача описывается тремя классификаторами — необходимость удержания объекта, контакт с окружающими объектами и тип движения. На основе классификации каждой элементарной задачи устанавливаются требования к ее выполнению. Например, если задача предполагает контакт с объектом окружающей среды

при движении по определенной траектории, то должны быть выполнены требования к точности движения и прикладываемому усилию. На основании требований, установленных для каждой элементарной задачи, а также информации об участвующих в сборке агентах (максимальный удерживаемый вес, точность, скорость и т.д.) и используемых объектах, оценщик возможностей вычисляет способность агента выполнить задачу, состоящую из n подзадач, которые, в свою очередь, состоят из m элементарных задач, при условии, что агент свободен. Агент способен решить задачу, если он имеет возможность решить все элементарные задачи и подзадачи. Оценщик эргономики оценивает положение тела человека во время проведения сборочных операций и рассчитывает рабочую нагрузку, которую испытывает человек при выполнении каждой задачи. Результаты оценщиков поступают на модуль распределения задач, который в зависимости от результата работы оценщика возможностей, если оценка произведена однозначно, передает задачу либо роботу, либо человеку. Если оценка неоднозначна, распределение осуществляется на основе вывода оценщика эргономики. Учитывается и нагрузка на человека. Если она больше допустимого порога, задача поручается роботу. В противном случае задачу решает человек. При этом модуль распределения следит за тем, чтобы человек не выполнял последовательно несколько задач и меняет порядок следования задач, если это возможно.

Решения, в основе которых свойства собираемых изделий и рабочего пространства

Работа [11] направлена на описание структуры для динамического распределения задач на основе физических свойств компонентов, характеристик задач и совместной рабочей области человека и робота. Данная методология разработана для преобразования уже существующих ручных сборочных ячеек и превращения их в коллаборативные ячейки. Начинается процесс распределения также с декомпозиции технологического процесса на элементарные задачи. Каждая задача оценивается по 6 критериям, с помощью которых определяется возможность ее автоматизации с помощью роботов. Критерии следующие: физические характеристики собираемых частей (вес, хрупкость, удобство захвата и чувствительность); удобство монтажа (допуск, направление сборки); снабжение (расположение собираемых деталей на рабочем месте, расстояние от места взятия детали до места ее установки); безопасность (опасность для человека рабочего инструмента робота, опасность соударения в зоне головы и шеи); необходимость скрепления деталей; прочие операции (выравнивание; фиксирование; необходимость дополнительного оборудования). Каждый критерий, как указано выше, определяется с учетом нескольких признаков, а каждый признак оценивается значением

в установленном диапазоне. Например, если собираемая деталь весит меньше 1 кг, т.е. такую деталь робот в состоянии перемещать, то признак «Вес» критерия «Физические характеристики деталей» оценивается максимальным значением, равным 4. После определения значений всех признаков для конкретной задачи, вычисляется значение критерия, характеризующее простоту автоматизированного решения задачи по данному критерию. Чем выше значение критерия, тем легче автоматизировать данный процесс с помощью роботов. Затем рассчитывается конечный показатель, равный отношению суммы значений, полученных по каждому критерию к максимально возможному значению. Этот конечный показатель характеризует возможность автоматизированного решения конкретной рассматриваемой задачи. Помимо этого, производится анализ времени работы человека и робота в процессе сборки с целью минимизации длительности простоев. Рассматривая процесс распределения задач в целом, можно заметить, что он происходит по следующему алгоритму. Проверяется окончание решения задачи, и, если она окончена, определяется потенциал решения следующей задачи роботом. Если он больше 70%, то проверяется доступность робота, и, если он доступен, то задача распределяется роботу. Во всех остальных случаях, задачу решает человек.

Работа [12] направлена на создание модели распределения задач между человеком и двумя коллаборативными роботами, предполагающая максимизацию возможностей каждого агента и минимизацию времени выполнения процесса сборочной операции. Распределение начинается с разбиения всего процесса сборки на элементарные «функциональные действия», каждое из которых кодируется специальным обозначением, например, «HR» — поднятие объекта и его перемещение в позицию с грубым допуском. Затем для многокритериальной оценки приоритета выполнения агентом задачи используется аналитический сетевой процесс, состоящий из 4 узлов, отражающих функциональное действие, особенности собираемой части, требования к агенту, совокупность агентов для выполнения. Каждый узел влияет на соседние, поэтому оценка осуществляется путем итерационного подбора оптимального, с точки зрения обеспечения требований, агента, наиболее подходящего для выполнения задачи. Затем, исходя из назначенных приоритетов агентам, а также времени выполнения задачи каждым агентом, осуществляется результирующее распределение задач. Каждое функциональное действие в списке приоритетов назначается приоритетному агенту. Если приоритетный агент недоступен, то действие будет возложено на второго приоритетного агента и так далее. Если все агенты недоступны, действие назначается аген-

ту с самым ранним временем завершения задачи. Для минимизации времени цикла и минимизации назначения заданий неподходящим агентам используется генетический алгоритм.

Комплексные методы распределения задач между человеком и роботом

В работе [13] представлен комплексный метод распределения задач, состоящий из 7 шагов. Во-первых, осуществляется предварительный анализ потенциала построения коллаборативной ячейки. Оценка основана на анализе задач по пяти комплексным критериям, затрагивающим вопросы безопасности и эргономики, качества продукции и экономики. Например, выясняется, существуют ли эргономические проблемы, связанные с подъемом тяжести, неудобные для человека позы, есть ли опасность плохого качества продукции. Затем проводится подробный анализ текущей ситуации на производстве. Входными данными являются особенности цикла сборки, среднее время сборки, затраты на оплату труда и т.д. Распределение задач между человеком и роботом осуществляется с использованием алгоритма распределения деятельности человека и робота (Human-Robot Activity Allocation — HRAA). Разбиение идет посредством применения к каждой задаче четырех показателей: индекса технической оценки TEI, индекса оценки безопасности и эргономики SEEI, индекса оценки качества QEI и индекса экономической оценки EEI. При этом важный фактор — это учет как сильных сторон, так и ограничений человеческих ресурсов и ресурсов роботов. Окончательное и общее распределение задач является результатом работы алгоритма и представляет собой индекс окончательной оценки FEI. Индекс может принимать значение «H» — задача выполняется исключительно человеком, «R» — исключительно роботом, «H или R» — в равной степени человеком и роботом, «H + R» — человеком с участием робота. Те задачи, в которых индекс окончательной оценки предполагает использование робота, оцениваются с целью расчета времени, которое требуется роботу на выполнение данной задачи. Это выполняется одним из двух методов: с использованием цифровой модели (цифровой двойник) или с использованием коэффициентов. Поскольку для вариантов, где индекс FEI = «H или R» возможны разные варианты последовательности сборки, то рассматривают $M = 2N$ сценариев, причем N — количество задач, имеющих вышеописанный индекс. Далее определяют оптимальный цикл сборки, основываясь на минимизации общего времени цикла сборки, с учетом ограничений сборки и диаграммы Ганта для каждого из возможных сценариев. Последним этапом является окончательный анализ экономической целесообразности различных сценариев, поскольку не всегда сценарий с наибольшим сокращением времени сборки является оптимальным

и не требует дополнительных денежных затрат. Примеры распределения задач по данной методологии и ее более подробное объяснение приведены в [14, 15].

В работе [16] описаны ошибки при построении коллаборативных ячеек, которые приводят к неоптимальному распределению обязанностей, поручаемых роботу и человеку. Среди них использование только качественных критериев без количественных оценок; использование слишком общих критериев, не учитывающих важные характеристики системы; рассмотрение критериев распределения, которые не приведут к оптимальным решениям; попытка полностью автоматизировать системный анализ и распределение задач; анализ и попытка декомпозиции сборки на неадекватном уровне детализации; ограничение количества режимов совместной работы.

В работе [17] предложен подход к повышению эффективности коллаборативных робототехнических систем через управление их составом на основе выполняемых членами команды функций и объемов работ. Ставится задача формирования неоднородной команды коботов, сводящаяся к решению задачи оптимизации в смысле минимизации затрат коллаборативной РТС, зависящих от объемов работ каждого вида, назначенных коботам и значений эффективности данных коботов, например, времени выполнения назначенных объемов работ.

В работе [18] рассматриваются принципы формирования коллаборативной робототехнической системы и методы коллективного распределения задач среди ее участников. Показано, что постановка задачи управления агентами коллаборативной ячейки нацелена на поиск эффективных действий участников на всех этапах работы, которые бы обеспечивали максимизацию функционала. В силу нелинейности и недостаточности априорной информации для распределения задач между участниками коллаборативной ячейки предлагается использовать итерационные методы.

Заключение

Анализ существующих решений в области построения методов и алгоритмов распределения задач между человеком и коллаборативными роботами показал, что эти решения нацелены на существенное облегчение работы человека и должны быть основаны на оценках по многим критериям возможностей робота, человека и особенностей производственного процесса.

В большинстве своем предлагаемые методы распределяют задачу только одному из агентов производственного процесса. Пока не полностью изучен вопрос распределения задач для согласованного, одновременного их выполнения коботом и человеком, отсутствует рассмотрение специфических коллаборативных задач.

В рассмотренных исследованиях отмечается необходимость распределения задач между человеком

и коботом с учетом процессов и явлений, приводящих к снижению работоспособности человека на коротких и длительных промежутках времени, связанных со старением, несчастными случаями и утомляемостью.

Открытой остается проблема определения критериев, на основе которых должно производиться распределение обязанностей агентов коллаборативной производственной ячейки. Перед разработчиками коллаборативных робототехнических систем стоит актуальная проблема создания наиболее эффективного метода распределения задач между участниками коллаборативной ячейки.

Библиографический список

1. Peshkin M. and J.E. Colgate. Cobots // *Industrial Robot: An International Journal*. 1999. vol. 26, no. 5, pp. 335–341.
2. Rozo, L., Amor, H.B., Calinon, S. et al. Special issue on learning for human–robot collaboration // *Auton Robot*, 2018, vol. 42, pp. 953–956.
3. Magrini, Emanuele & Ferraguti, Federica & Ronga, Andrea & Pini, Fabio & Luca, Alessandro & Leali, Francesco. Human-robot coexistence and interaction in open industrial cells // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, 101846.
4. Murali, P.K., Darvish, K., & Mastrogiovanni, F. Deployment and Evaluation of a Flexible Human-Robot Collaboration Model Based on AND/OR Graphs in a Manufacturing Environment // *Intelligent Service Robotics*, 2020, vol. 13, pp. 439–457.
5. Gualtieri, Luca & Palomba, Ilaria & Merati, Fabio & Rauch, Erwin & Vidoni, Renato. Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: A Case Study // *Sustainability*, 2020, vol.12, 3606.
6. Gervasi, Riccardo & Digiario, Francesco & Mastrogiacomo, Luca & Maisano, Domenico & Franceschini, Fiorenzo. Comparing quality profiles in Human-Robot Collaboration: empirical evidence in the automotive sector // *4th International Conference on Quality Engineering and Management At: University of Minho, Portugal*. 2020.
7. Hanna, Atieh & Bengtsson, Kristofer & Gotvall, Per-Lage & Ekstrom, Mikael. Towards safe human robot collaboration — Risk assessment of intelligent automation // *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2020, pp. 424–431.
8. Liu, Zitong & Liu, Quan & Xu, Wenjun & Liu, Zhihao & Zhou, Zude & Chen, Jie. Deep Learning-based Human Motion Prediction considering Context Awareness for Human-Robot Collaboration in Manufacturing // *Procedia CIRP*, 2019, vol. 83, pp. 272–278.
9. Ranz, Fabian & Hummel, Vera & Sihn, Wilfried. Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration // *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 9, pp. 182–189.

10. El Makrini, Ilias & Merckaert, Kelly & De Winter, Joris & Lefeber, Dirk & Vanderborght, Bram. Task allocation for improved ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly // *Interaction Studies*, 2019, vol.20, pp. 103–134.
11. Malik, Ali Ahmad & Bilberg, Arne. Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution // *ProcediaCIRP*, 2019, vol. 81, pp. 665–670.
12. Liao, Yee Yeng & Ryu, Kwangyeol. Task Allocation in Human-Robot Collaboration (HRC) Based on Task Characteristics and Agent Capability for Mold Assembly // *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 51, pp. 179–186.
13. Gualtieri, Luca. Methodologies and guidelines for the design of safe and ergonomic collaborative robotic assembly systems in industrial settings, 2021.
14. Gualtieri, Luca & Rojas, Rafael & Garcia, Manuel & Rauch, Erwin & Vidoni, Renato. Implementation of a Laboratory Case Study for Intuitive Collaboration Between Man and Machine in SME Assembly // *Industry 4.0 for SMEs*, 2020, pp. 335–382.
15. Gualtieri, Luca & Rauch, Erwin & Vidoni, Renato. Methodology for the definition of the optimal assembly cycle and calculation of the optimized assembly cycle time in human-robot collaborative assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 113, pp. 2369–2384.
16. Mateus, Joao & Aghezzaf, El-Houssaine & Claeys, Dieter & Limère, Veronique & Cottyn, Johannes. Method for transition from manual assembly to Human-Robot collaborative assembly // *IFAC-Papers OnLine*, 2018, vol. 51 (11), pp. 405–410.
17. Галин Р.Р., Серебряный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах // *Известия Юго-Западного государственного университета*. — 2020. — № 24 (4). — С. 180–199.
18. Галин Р.Р., Камешева С.Б. Эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы в едином пространстве // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. — 2021, — № 1. — С. 5–14.

Илюхин Юрий Владимирович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

ilyv_178@rambler.ru

Топорин Андрей Александрович — аспирант кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

zator96@yandex.ru

Ilyukhin Yuri Vladimirovich — D. Sc. in Engineering, head of the sub-department of “Robotics and Mechatronics” of MSUT “STANKIN”.

ilyv_178@rambler.ru

Toporin Andrey Alexandrovich — postgraduate student at the sub-department of “Robotics and Mechatronics” of MSUT “STANKIN”.

zator96@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СИСТЕМА РЕАБИЛИТАЦИИ МИКРОМОТОРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ОДИНОЧНОЙ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ

REHABILITATION SYSTEM OF HUMAN MICROMOTOR CAPABILITIES. MODELING AND LOOP SHAPING OF SINGLE-DOF

Предложена новая концепция реабилитационной системы, призванная помочь лицам без кистей восстановить микромоторные возможности. Микроманипулятор встроен в протезы и управляется оператором (ЛБК), что позволяет системе выполнять точные движения. Для системы выполнено математическое моделирование. Построен алгоритм управления человеко-машинной системой. Моделирование выполнено для обеспечения способности ЛБК успешно контролировать положение инструмента с помощью этой системы. Доказана способность системы достигать своего назначения с соблюдением технических требований в идеальных условиях. По результатам моделирования даны рекомендации по обучению пользователя данной системы.

A new rehabilitation system is proposed for significant restoration of microbial capacity. The micromanipulator is built into the prostheses and is controlled by an operator (upper-limb amputee), which allows the system to perform precise movements. Mathematical modeling was performed for the system. The algorithm for controlling a human-machine system was constructed. The simulation is performed to ensure the upper-limb amputee's ability to successfully control the position of the instrument using this system. The ability of the system to reach its destination in compliance with technical requirements in ideal conditions has been proven. Based on the simulation results, recommendations for training the user of this system are given.

Ключевые слова: система реабилитации, микромоторные возможности, протезирование, лиц без кистей (ЛБК), адаптивная опора, человеко-машинная система, система управления.

Keywords: rehabilitation system, micromovement, prosthesis, upper-limb amputee, adaptive support, Human-in-the-loop, control system.

Введение

Протезы верхних конечностей можно разделить на две основные категории в зависимости от системы управления. Первая — это протезы с питанием от тела, обычно использующие систему управления Боден-гроссом. Такая система передает движения и силы, генерируемые в основном мышцами плеча, на концевые части протеза (в большинстве крюки). Второй — бионические протезы, использующие электромиографические сигналы (электромиографический электрод) для управления терминальным устройством протеза [1]. Такие протезы обычно имеют человекоподобную кисть, пять пальцев, включая полностью функциональный большой палец [2]. В электромиографических сигналах есть информация, по которой специальные алгоритмы могут определять намере-

ния пользователя. Система электромиографического управления использует существующую нервно-мышечную систему (культя). Для этого необходим алгоритм обучения распознавания, в котором извлекаются определенные характеристики сигнала и используются для управления терминальным устройством протеза [3]. В некоторых случаях инерциальный измерительный модуль может быть размещен на ноге пользователя и использоваться совместно с системой электромиографического управления протезом с несколькими степенями подвижности [4]. В последние годы разработка систем управления в области протезов была направлена на совершенствование алгоритмов сбора и классификации паттернов электромиографических сигналов для более точного выполнения желаемых движений. В одном исследовании [5] был опробован новый метод обработки сигналов с использованием

спектральных признаков с искусственной нейронной сетью для классификации 17 произвольных движений по электромиографическим сигналам.

Были представлены и другие способы повышения управляемости протеза. В исследовательской работе [6] предложена структура регрессии на основе Гауссовского процесса для непрерывного прогнозирования состояния отсутствующих конечностей путем исключительного декодирования движений отсутствующих конечностей из неповрежденных конечностей. В другой исследовательской работе [7] рассматривалось использование движений культи для замены мышечной активности в качестве входных команд, для разработки более естественных и интуитивно понятных методов управления. Имеющиеся коммерческие протезы все еще недостаточны для достижения деликатных движений и точности человеческой руки. Бионические руки все еще обеспечивают меньшую силу активации, чем крючки [8]. Самые передовые протезы в основном выполняют задачи по захвату и перемещению объектов, поэтому крючки с приводом от тела еще являются более подходящим выбором для многих пользователей [9]. Способности выполнять микродвижения и манипулировать инструментами с высокой точностью далеко не интегрированы в протезы рук. Имея ограниченные и неубедительные результаты, исследование [10] изучало работу ЛБК с помощью техники микродвижения и времени, но с использованием крюка с приводом от тела вместо электромеханического протеза.

Человек в контуре — это термин в области систем «человек-машина», когда физическая система полностью или частично контролируется человеком-оператором с помощью различных средств ввода. В таких системах человек наблюдает за выводами системы, чтобы получить всю важную информацию и предпринять соответствующие действия. Эта конфигурация представляет собой обратную связь между динамической системой и человеком-оператором (контроллером) [11]. В данной статье исследуется интеграция ЛБК в контур управления предлагаемой реабилитационной системы для перемещения инструмента с высокой точностью.

Краткое описание предлагаемой системы реабилитации

Предлагаемый протез оснащается многостепенным манипулятором с адаптивной опорой, выполненной с возможностью фиксации на неподвижных объектах окружающей среды.

Процесс перемещения инструмента разделяется на фазы предварительного грубого и конечного точного движения. На первой фазе ЛБК своей культей свободно переносит протез с инструментом к области целевого завершающего точного движения. На второй фазе протез с инструментом опирается на рабочий стол или иные окружающие предметы и инструмент с требуемой точностью медленно подводится к целевой точке. Например, хвостовик миниатюрного винта вводится в резьбовое отверстие собираемого прибора.

Одной из альтернативных реализации предлагаемой концепции реабилитационной системы приводится 3D-модель протеза со встроенным манипулятором на адаптивной опоре (рис. 1).

Для перемещения большинства видов инструментов с электроприводом, например, винтоверта, достаточно манипулятора с тремя степенями подвижности. А именно, выдвигание вдоль продольной оси протеза и качание относительно двух поперечных осей. При перемещении с одного места на другое, при достижении места опор могут быть отпущены и затем закреплены на нужной высоте инструмента. Сменные инструменты удерживаются антропоморфной кистью или рабочим захватным устройством, и адаптеры в виде байонетных соединений обеспечивают ЛБК возможность легкой смены захватного устройства.

В данной статье представлена только кинематическая схема реабилитационной системы с одной степенью подвижности, как показано на рисунке 2. Основной корпус 3 соединен с приемной гильзой 2 через силомоментный датчик 4 с одной стороны и с рабочим органом 12 также через силомоментный датчик 5 с другой стороны. Манипулятор с одной степенью подвижности удерживает основной корпус 3 на основании 1, имеющем четыре опоры и тормозной



Рис. 1. Общий вид предлагаемой системы: 1 — гильза, 2 — манипулятор, 3 — рабочий орган, 4 — адаптивные опоры, 5 — инструмент

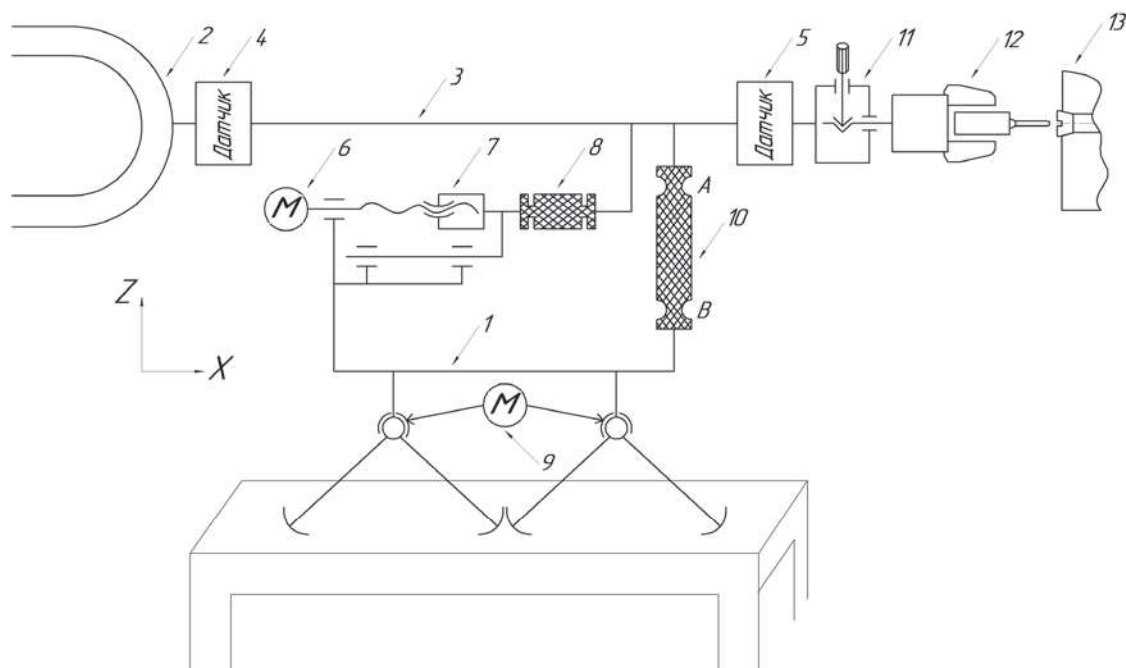


Рис. 2. Кинематическая схема манипуляторной системы с одной степенью подвижности

механизм с одним двигателем 9. Упругая подвеска 10 соединяет основной корпус 3 с основанием 1. Она является центром вращательных движений основного корпуса относительно основания под воздействием манипулятора. Кроме того, байонетные адаптеры 11 позволяют ЛБК легко менять рабочий орган 12.

Упругая подвеска 10 заменяет гибкие пары, крепится между основным корпусом и основанием. Он выполнен в виде рамки из упругого материала (полимера или бронзы) с локальными надрезами и допускает с небольшим сопротивлением повороты относительно поперечных осей протеза и смещение вдоль его продольной оси.

Гайка 7 линейных актуаторов соединены с основным корпусом 3 через деформируемые звенья с надрезами 8 для возможности компенсации непрямолинейности.

Двигатель 6 через винт-гайку 7 и развязку 8 обеспечивает поступательное движение в направлении оси +X и создает на основном корпусе 3 крутящий момент. За счёт этого упругая подвеска 10 изгибается в точке 'B', позволяют рабочему органу 12 и основному корпусу 3 совершать вращательное движение вокруг оси Y, пересекая точку 'B'. В пределах микроперемещений, кривая траектории рабочего конца инструмента может быть аппроксимирована прямой линией.

В данной реабилитационной системе управление микроманипулятором может осуществляться по сигналам от силомоментного датчика, установленного между гильзой и основным корпусом. Кроме того, внешнее устройство, такое как педаль, джойстик, кнопки или голосовые команды, может

использоваться в качестве входного сигнала. Силомоментный датчик, расположенный между рабочим органом и основным корпусом микроманипулятора для обеспечения силовой обратной связи с системой управления.

Математическое моделирование системы реабилитации

Модель предлагаемой реабилитационной системы с одной степенью подвижности представлена на рисунке 3. Модель механического импеданса руки человека основана на модели Войта [12], где m_a , b_a и k_a — параметры импеданса, обозначающие массу, демпфирование и жесткость остаточной культы соответственно. Значение жесткости k_s зависит от типа датчика, расположенного между гильзой и корпусом протеза. Масса тела протеза, рабочего органа и любой прикрепленной нагрузки представлена в массе m_c . Привод (двигатель постоянного тока) с механизмом винт-гайка присоединяют к концевому устройству и закрепляют на базе протеза. Масса манипулятора и основания представлена в виде массы m_b . Усилие F_m создается линейными перемещениями механизма винт-гайка и прикладывается к рабочему органу. Сила механизма также прикладывается к основанию протеза, так как на каждое действие есть равное и противоположное противодействие. Жесткость k_b представляет нежесткое соединение между рычагами (нижние части покрыты противоскользящим материалом) и рабочим столом. В фазе точного движения адаптивные рычаги могут скользить под действием силы механизма.

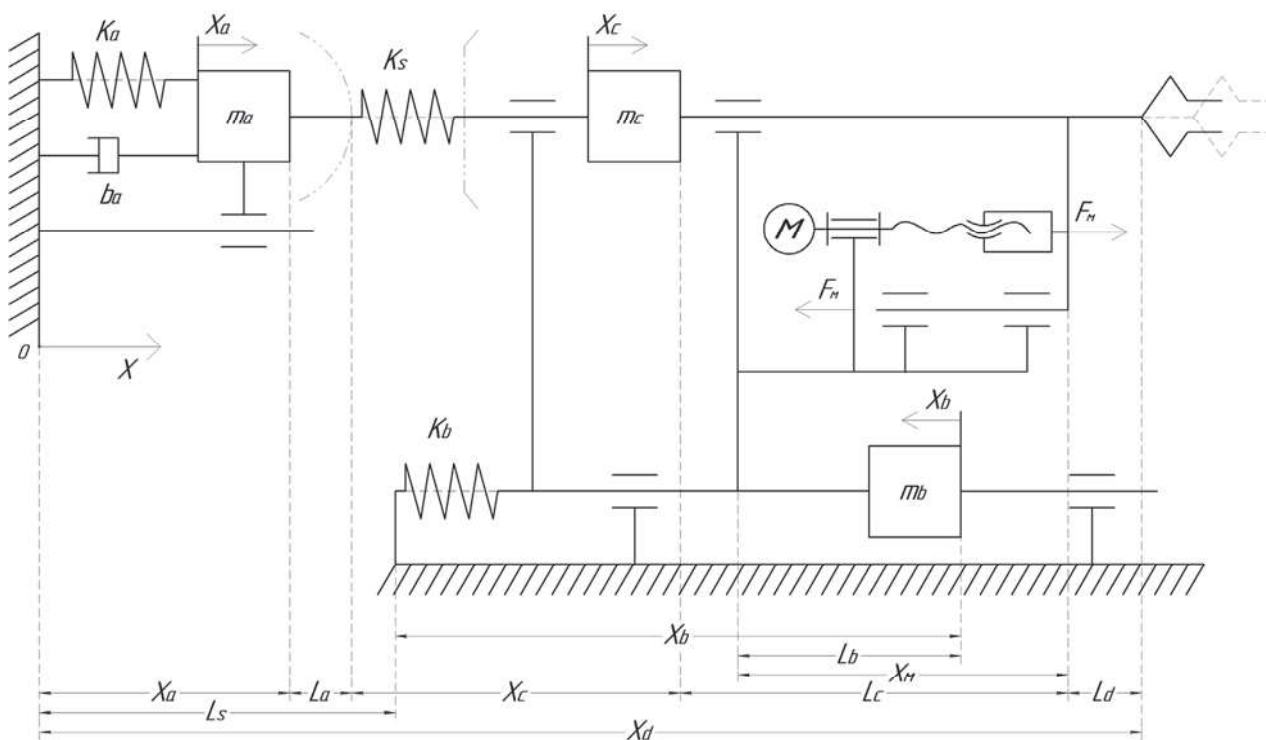


Рис. 3. Модель реабилитационной системы с одной степенью подвижности

В предлагаемой конструкции реабилитационной системы положение x_c должно реализовываться в результате вращательного движения, а не линейного. Однако из-за этого небольшого диапазона перемещения (микродвижения) перемещение рабочего органа (или инструмента) может быть аппроксимировано как линейное.

В этой модели входной сигнал, активирующий один привод, генерируется внешним устройством, таким как педаль или джойстик. Механизм винт-гайка передает крутящий момент двигателя на силу F_m . Манипулятор с одной степенью подвижности расположен между основанием и корпусом протеза. Конфигурация системы указывает на то, что нагрузка на мотор представляет собой объединение корпуса протеза и рабочего органа с любой приставкой инструмента к нему, помимо основания протеза.

На рисунке 3 размерности $\{L_i; i = a, b, c, d, s\}$ — фиксированные векторы, а $\{X_j; j = a, b, c, d, m\}$ — переменные векторы. Положение рабочего органа (инструмент) X_d по оси X определяется следующим образом:

$$\Delta \| \overline{X_d} \| = \Delta \| \overline{X_a} \| + \Delta \| \overline{X_c} \| \quad (1)$$

Приведение в действие двигателя постоянного тока изменяет длину X_m , который определяется:

$$\Delta \| \overline{X_m} \| = \Delta \| \overline{X_d} \| + \Delta \| \overline{X_b} \| \quad (2)$$

Передачная функция скорости якоря двигателя:

$$H_1(s) = \frac{\Omega_m(s)}{E(s)} \quad (3)$$

где: E — напряжение якоря двигателя; Ω_m — скорость якоря двигателя; u_m — передаточное отношение механизма; u_g — передаточное отношение редуктора; ψ — угол подъема резьбы; ϕ — угол трения; d — средний диаметр резьбы; R_a — сопротивление якоря двигателя; L_a — индуктивность якоря двигателя; f_{tr} — коэффициент трения скольжения на пяте; J_{tot} — приведенный к валу двигателя момент инерции системы; B — вязкостный коэффициент демпфирования двигателя.

$$\begin{aligned}
 H_1(s) = & \frac{k_m u_g u_m \left((m_a m_b + m_a m_c) s^5 + (b_a m_b + b_a m_c) s^4 + ((k_a + k_s)(m_b + m_c) + (k_b + k_s) m_a) s^3 + (b_a k_b + b_a k_s) s^2 + (k_a k_b + k_s k_b + k_a k_s) s \right)}{\left((m_a m_b + m_a m_c) L_a J_{tot} u_g u_m + L_a a_r m_a m_c m_b \right) s^7} \\
 & + \left((b_a m_b + b_a m_c) L_a J_{tot} u_g u_m + (m_a m_b + m_a m_c) (R_a J_{tot} + L_a B) u_g u_m + L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) b_a m_c m_b + R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) m_a m_c m_b \right) s^6 \\
 & + \left(\left((k_a + k_s)(m_b + m_c) + (k_b + k_s) m_a \right) L_a J_{tot} u_g u_m + (b_a m_b + b_a m_c) (R_a J_{tot} + L_a B) u_g u_m \right. \\
 & \left. + (m_a m_b + m_a m_c) (k_m k_e + R_a B) u_g u_m + ((k_a + k_s) m_c m_b + k_s m_a m_b + k_b m_a m_c) L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) + R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) b_a m_c m_b \right) s^5 \\
 & + \left((b_a k_b + b_a k_s) L_a J_{tot} u_g u_m + ((k_a + k_s)(m_b + m_c) + (k_b + k_s) m_a) (R_a J_{tot} + L_a B) u_g u_m + (b_a m_b + b_a m_c) (k_m k_e + R_a B) u_g u_m \right. \\
 & \left. + (b_a k_s m_b + b_a k_b m_c) L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) + ((k_a + k_s) m_c m_b + k_s m_a m_b + k_b m_a m_c) R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) \right) s^4 \\
 & + \left((k_a k_b + k_s k_b + k_a k_s) L_a J_{tot} u_g u_m + (b_a k_b + b_a k_s) (R_a J_{tot} + L_a B) u_g u_m + ((k_a + k_s)(m_b + m_c) + (k_b + k_s) m_a) (k_m k_e + R_a B) u_g u_m \right. \\
 & \left. + ((k_a + k_s) k_b m_c + k_s k_b m_a + k_a k_s m_b) L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) + (b_a k_s m_b + b_a k_b m_c) R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) \right) s^3 \\
 & + \left((k_a k_b + k_s k_b + k_a k_s) (R_a J_{tot} + L_a B) u_g u_m + (b_a k_b + b_a k_s) (k_m k_e + R_a B) u_g u_m + ((k_a + k_s) k_b m_c + k_s k_b m_a + k_a k_s m_b) R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) \right. \\
 & \left. + L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) b_a k_s k_b \right) s^2 \\
 & + \left((k_a k_b + k_s k_b + k_a k_s) (k_m k_e + R_a B) u_g u_m + R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) b_a k_b k_b + L_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) k_a k_s k_b \right) s \\
 & + R_a \frac{d}{2} * (tg(\psi + \varphi) + f_{ir}) k_a k_s k_b
 \end{aligned}$$

Изменение положения рабочего органа происходит в результате смещения механизма после включения двигателя. Передаточная функция положения рабочего органа:

$$H_2(s) = \frac{X_d(s)}{X_m(s)} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 H_2(s) = & \frac{m_a m_b m_b s^6 + b_a m_b m_b s^5 + ((k_a + 2k_s) m_b m_b + 2k_b m_a m_b) s^4 + 2b_a k_b m_b s^3 + ((2k_a + 4k_s) k_b m_b + k_b k_b m_a) s^2 + b_a k_b k_b s + k_a k_b k_b + 2k_s k_b k_b}{(m_a m_b m_b + m_a m_c m_b) s^6 + (b_a m_b m_b + b_a m_c m_b) s^5 + ((k_a + 2k_s) m_b m_b + 2k_b m_a m_b + (k_a + k_s) m_c m_b + k_s m_a m_b + k_b m_a m_c) s^4 + (2b_a k_b m_b + b_a k_s m_b + b_a k_b m_c) s^3} \\
 & + ((2k_a + 4k_s) k_b m_b + k_a k_s m_b + k_b k_b m_a + (k_a + k_s) k_b m_c + k_s k_b m_a) s^2 + (b_a k_b k_b + b_a k_s k_b) s + k_a k_b k_b + 2k_s k_b k_b + k_a k_s k_b
 \end{aligned}$$

Система H_2 содержит только параметры механических элементов модели. Отклик системы H_2 на ступенчатом входном сигнале помогает понять динамику модели при выборе различных элементов. Например, значение жесткости k_s зависит от типа используемого датчика. В случае использования инфракрасного датчика значение k_s равно нулю. В то время как использование силомоментного датчика представлено значением жесткости, связанным с характеристиками датчика (например, $k_s = 7 * 10^7 N/m$ [15]).

Система управления и формирование контуров

Целью данной системы управления является «деликатное и точное перемещение инструмента из начальной точки в заданную».

После достижения заданной точки (объекта) рычаги отпускаются и протез фиксируется на желаемой высоте, после чего начинается фаза точного движения. На этом этапе ЛБК контролирует положение инструмента, при этом его культя соединена с гильзой протеза. С помощью устройства ввода ЛБК подает сигнал, приводящий в действие при-

вод манипулятора. Инструмент начинает двигаться в желаемом направлении к заданной точке. При этом именно ЛБК определяет направления движения и выполнение задач.

На рисунке 4 приведена блок-схема системы управления с двумя контурами обратной связи, которая является разновидностью системы «человек в контуре управления». Внутренний контур управления скоростью содержит смоделированную динамическую систему с регулятором и датчиком скорости. Во внешнем контуре управления положением ЛБК становится частью системы управления. Человеческое зрение предоставляет мозгу человека-оператора информацию обратной связи о положении, скорости и ориентации инструмента, где датчиком, замыкающим контур положения, выступают глаза человека. Мозг — это нейронный контроллер, который использует свои когнитивные функции для оценки текущего состояния системы. Эта оценка используется для определения текущей погрешности положения инструмента относительно заданной точки. ЛБК определяет опорную скорость инструмента и передает с помощью устройства ввода во внутренний контур управления.

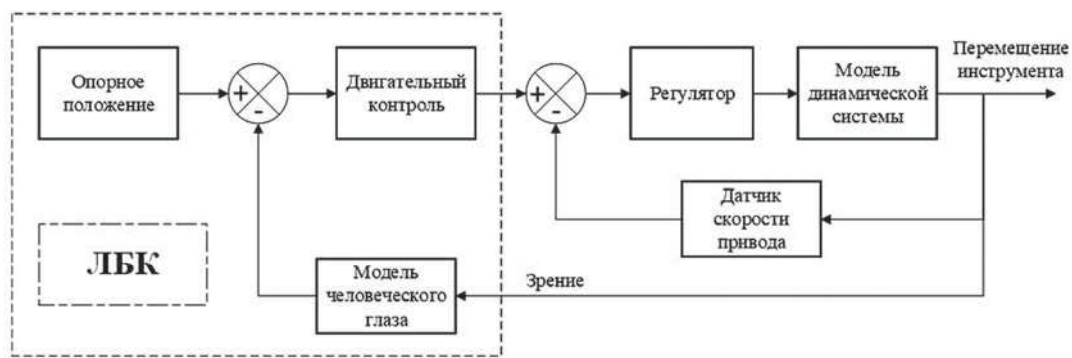


Рис. 4. Блок-схема системы «человек в контуре управления» для реабилитационной системы с одной степенью подвижности

А. Идеальная модель человека в системе

С помощью зрения ЛБК определяет пространственные характеристики (положение и ориентация) и свойства (размер, форма, материал) целевого объекта [16]. С помощью данной обратной связи процесс генерации управляющего сигнала мозгом можно представить в виде ПИД-регулятора. На основании того, что в каждый момент времени ЛБК может определять текущее положение инструмента (коэффициент пропорциональности), наряду с предыдущим положением (коэффициент интегрирования) и будущим положением (коэффициент дифференцирования), которые получаются путем наблюдения за положением и скоростью инструмента. С другой стороны, ЛБК также, вероятно, будет контролировать положение инструмента аналогично задаче управления транспортным средством, где оператор оценивает расстояние до желаемого положения, затем совершает передвижение с максимальной скоростью, а при приближении к цели замедляется, пока инструмент не достигнет желаемого положения.

Сенсорные рецепторы остаточной культи, расположенные в гильзе протеза, дают некоторое ощущение движения, это ощущение дополняет сенсорную обратную связь. В данном случае этот тип обратной связи в системе не моделируется, так как сенсорные рецепторы в культе могут различаться в зависимости от последствий той или иной ампутации.

Дополнительная обратная связь для человеческого мозга в системе представляет собой обратную связь в режиме реального времени, которая требует от ЛБК необходимого обучения и адаптации. На этом этапе исследования предлагается, что системой управляет опытный пользователь. Передача команд от мозга человека к скелетным мышцам через нервную систему происходит не мгновенно, присутствует задержка во времени, что приводит к запоздалой реакции. Такая же задержка возникает при передаче дополнительной сенсорной обратной связи в мозг. Пренебрежение задержкой реакции человека означает, что модель человеческого глаза представляется идеальной системой, не имеющей задержек и погрешностей.

Б. ЛБК в контуре системы управления

Система управления с идеальной моделью ЛБК представлена на рисунке 5. Технические требования на этапе точного перемещения: максимальная скорость инструмента $v_{d, \max} = 1$ мм/с, положение инструмента $X_d \in [-5, +5]$ мм вокруг стабильного положения манипулятора. Из уравнения (15), максимальная скорость якоря $\omega_{m, \max} = u_g * u_m * (v_{d, \max} / G_{H_2}(0)) = 15.87$ рад/с. Масса $m_c = 3$ кг, где нагрузка, прикрепленная к рабочему органу — включая инструмент — должна достигать 1,5 кг, а масса тела протеза с рабочим органом приблизительно равна 1,5 кг. Кроме того, масса m_b приблизилась к 5 кг. Параметры культи получены из литературы [12–14], где: $m_a = 0.324$ кг,

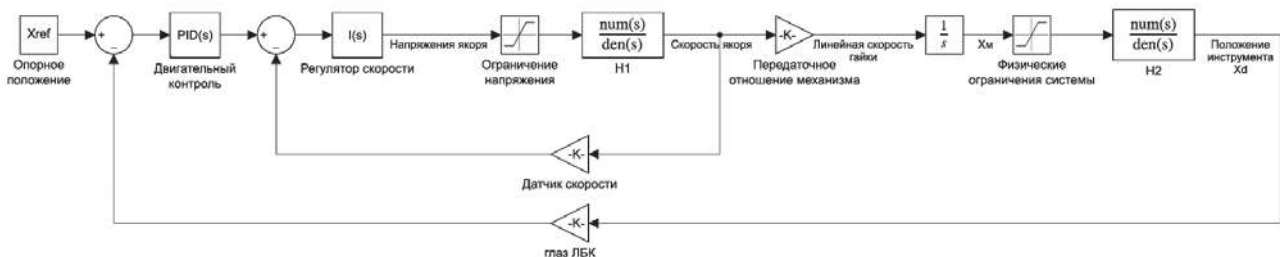


Рис. 5. Система управления реабилитационной системой с одной степенью подвижности в «Simulink»

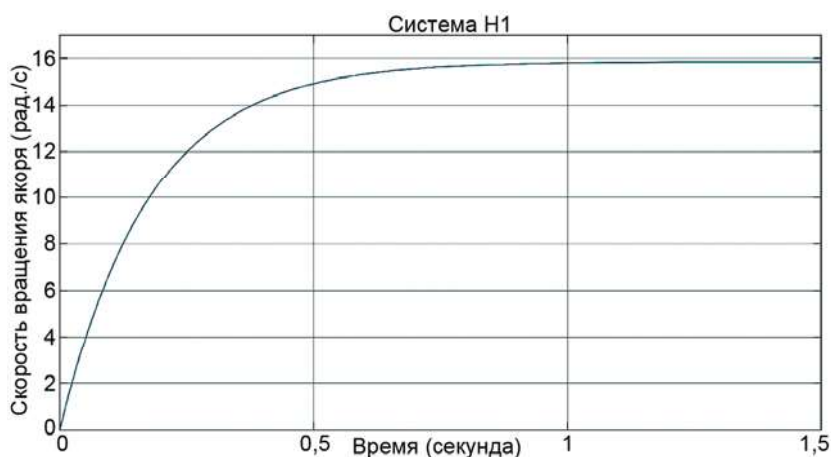


Рис. 6. Отклик контура обратной связи для управления скоростью якоря двигателя

$b_a = 5.92 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$ and $k_a = 104.8 \text{ Н/м}$. Что касается жесткости датчика $k_s = 7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ и выбранной жесткости $k_b = 1000 \text{ Н/м}$. Для достижения желаемой скорости и усилия используется двигатель постоянного тока Махон RE 65 с редуктором $u_g = 4$. Диаметр ходового винта по предлагаемой конструкции $d_n = 3 \text{ мм}$ с КПД 30%, передаточное отношение механизма винт-гайка $u_m = 3770 \text{ рад/с}$.

После рассмотрения ограничений физических компонентов системы на рисунке 6 показана отклик контура обратной связи системы H_1 , где интегральный регулятор с коэффициентом усиления $KI_{velocitycontroller}$ используется для достижения требуемой максимальной скорости $v_{d,max}$ с временем установления $t_{c1} = 0.53 \text{ с}$.

Что касается управления положением инструмента X_d , то опорный сигнал внутреннего контура (контур управления скоростью) — это сигнал, генерируемый оператором при наблюдении за инструментом и через внешнее устройство, оператор контролирует ско-

рость инструмента с целью изменения его положения. Для моделирования данного процесса предложено использование одного из двух методов.

Первым вариантом является ПИД-регулятор «Двигательный контроль» с настроенным усилением: $K_p = 1663$, $K_i = 0$, $K_d = 0$. Во время изучения возможности человека-оператора управлять системой, используя ПИД-регулятор, в процессе настройки обнаружилось, что пропорционального для стабилизации системы ш вполне достаточно пропорционального регулятора H_2 .

Второй вариант представляет собой трапециевидный профиль скорости в качестве управляющего сигнала от оператора (рис. 7), где v_{lim} и a_{lim} являются предельными значениями скорости и ускорения, ограниченными спецификацией двигателя и механической конфигурацией системы. В фазе ускорения инструмент достигает своей максимальной скорости $v_{d,max}$ в момент времени $t_1 = t_{c1} + t_{nr} = 1 \text{ с}$, где t_{nr} — расчетная скорость отклика человека-оператора на запуск процесса управления.

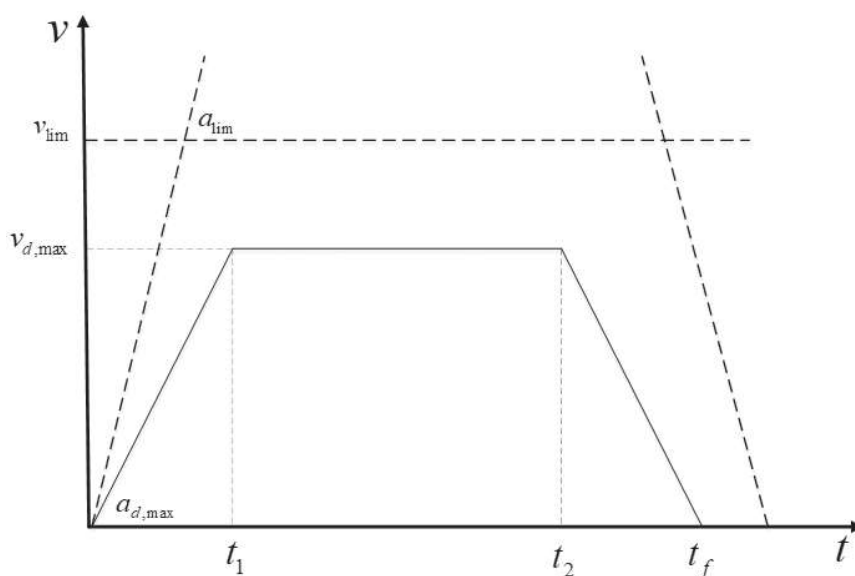


Рис. 7. Трапециевидный профиль скорости

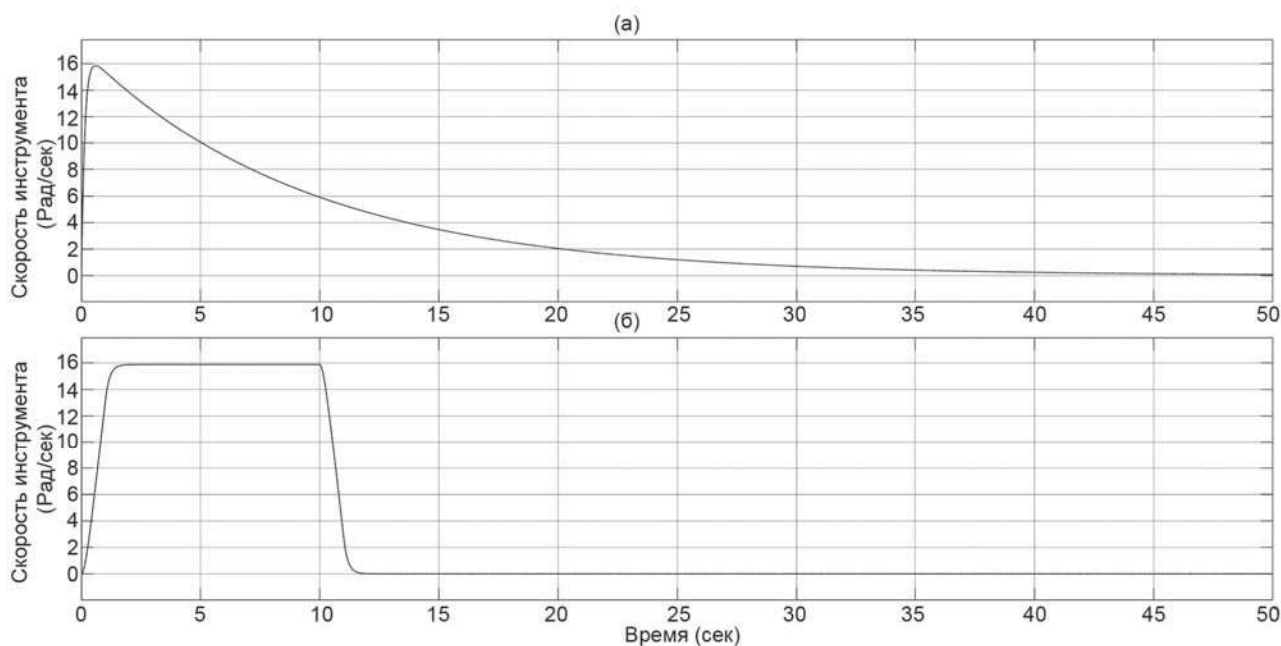


Рис. 8. Генерируемый ЛБК сигнал управления скоростью для смещения инструмента на 10 мм в виде: (а) ПИД-регулятора, (б) профиля скорости

Ограничение $t_1 = t_2$ выбрано для определения параметров профиля скорости.

Используя программное обеспечение Matlab Simulink, мы проанализировали возможность перемещения инструмента на расстояние $\Delta X_d = 10$ мм, при его движении на протяжении всего пути с максимальной скоростью $v_{d, \max} = 1$ мм/с. На рисунке 8 показан сигнал управления скоростью, созданный ПИД-регулятором и построенной функцией профиля скорости, затем на рисунке 9 представлено перемещение инструмента в качестве реакции системы на оба сигнала.

Результаты моделирования и симуляции

Время стабилизации перемещения инструмента, поведение системы и точность положения являются ключевыми параметрами для анализа результатов моделирования. Достижение цели системы управления при рассмотрении технических требований модели является показателем способности предлагаемой реабилитационной системы помочь людям с ампутированными конечностями участвовать в некоторых производственных работах и выполнять задачи.

Для генерации управляющего сигнала оператора использовался ПИД-регулятор в контуре управления положением. Входные данные для ПИД-регулятора «Двигательный контроль» — сигнал ошибки положения, полученный с помощью идеальной модели человеческого глаза. Из сигнала ошибки выход ПИД-регулятора становится эталоном контура управления скоростью. В процессе настройки с учетом электромеханических

ограничений система стабилизировалась с использованием только пропорционального регулятора с временем установления $t_{MC} = 43.4$ мм при допуске $10 \pm 0,1$ мм (Рис. 9(a)). Такое длительное время достижения точки назначения недопустимо, особенно когда 9 секунд теоретически достаточно для перемещения на максимальной скорости $v_{d, \max}$. Тем не менее, сокращение времени установления t_{MC} не представляется возможным, потому что добавление интегрального усиления $K_{I, motorcontrol}$ вызовет перерегулирование в отклике системы, это означает, что положение инструмента превысит целевую точку, после этого система начнет колебаться до тех пор, пока инструмент не станет стабильным. Во многих задачах, где инструмент может использоваться для сварки, измерения или откручивания деталей, перерегулирование не приемлемо. Перемещение маленького объекта из точки в точку является интуитивно понятной задачей для взрослых, так же, как и для водителя, движущегося на коротком расстоянии, ни один из них не требует большого количества размышлений. Начало движения до достижения адекватной скорости, а затем замедление вблизи заданного положения является логическим действием, которое, как ожидается, будет выполняться человеком-оператором для выполнения такой задачи. Аналогичным образом, предложена та же логика для перемещения инструмента из одного положения в другое. Учитывая, что оператор перемещает инструмент в соответствии с профилем скорости, показанным на рисунке 8(b), реакция системы быстрее, время установления $t_{MC} = 10.7$ с при допуске 10 ± 10 мм (Рис.9(б)). Это является более приемлемым временем

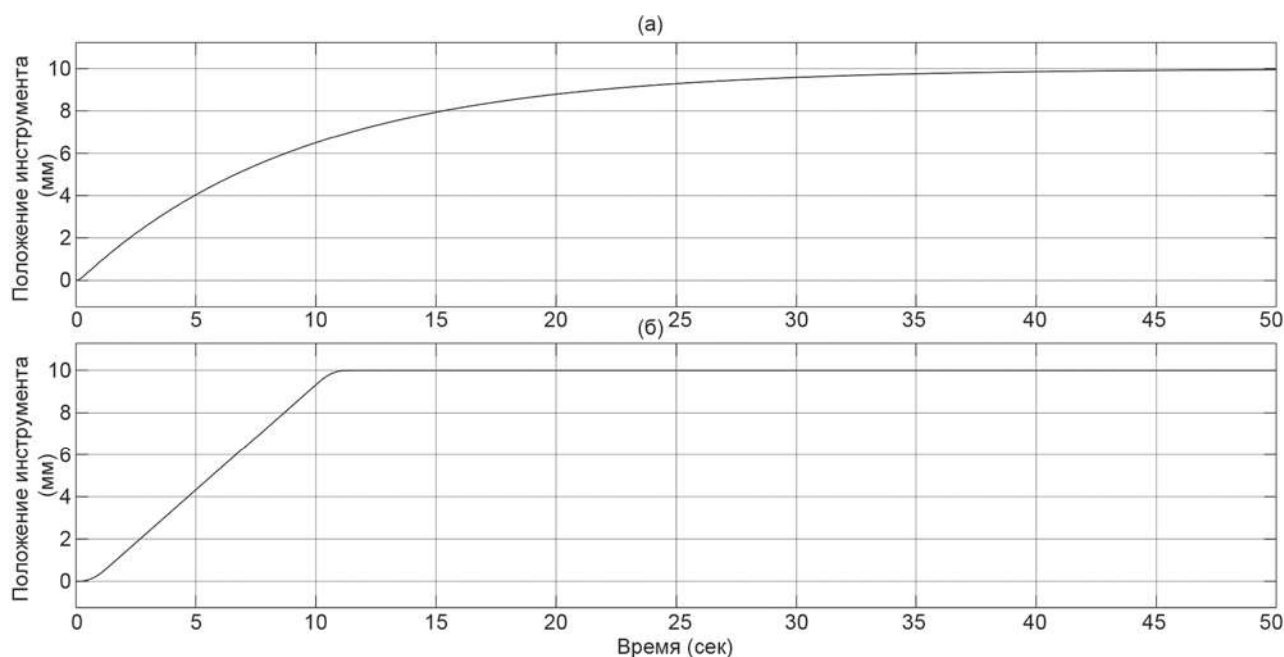


Рис. 9. Отклик системы H_2 на сигнал управления скоростью: (а) ПИД-регулятор, (б) профиль скорости

для перемещения инструмента по диапазону движения отверстия (10 мм).

Из рисунка 8(а) видно, что сигнал скорости не является оптимальным, потому что ни при каких нормальных условиях оператор-человек не мог бы перемещать инструмент таким образом между двумя положениями. Профиль скорости на рисунке 8(б) показывает, как извлечь выгоду из максимальной скорости $v_{d, \max}$ для выполнения задачи. Таким образом, рисунок 9 демонстрирует большое отличие установления времени при использовании ПИД-регулятора и профиля скорости для управления положением инструмента. Это несоответствие по времени может быть объяснено зависимостью линейности регулятора, где из-за линейности используемого ПИД-регулятора достижение желаемого времени установления без перенастройки невозможно для этой системы. Использование профиля скорости аналогично использованию нелинейного регулятора, где пропорциональное и интегральное усиления работают раздельно. Работа начинается с использования пропорционального регулятора для увеличения скорости до максимального значения $v_{d, \max}$, затем переключения на интегральный регулятор для поддержания максимальной скорости до тех пор, пока инструмент не окажется рядом с целью. После этого следует обратное переключение на пропорциональный регулятор. Это упрощенное объяснение использования профиля скорости в качестве нелинейного регулятора, которое показывает основное различие между используемыми методами генерации человеческого сигнала «Двигательный контроль».

На рисунке 8 показано, что интегральный регулятор в петле скорости способен задействовать вибрацию от системы, вызванную упругим элементом механической модели. Это приводит к стабильному движению инструмента, позволяя оператору «направить» его в заданное положение. В зависимости от результатов моделирования рекомендуется использовать метод профиля скорости для контроля положения инструмента, это должно быть разъяснено обучаемым, которые проходят обучение по системе реабилитации. Также результаты подтверждают, что человек-оператор может управлять предлагаемой механической конструкцией с упругими элементами.

Ещё одним важным ключевым моментом для оценки системы является точность движения инструмента и погрешность его положения, относительно желаемого значением $|error(X_d)| \approx 0.1$ мм, это значение достаточно выполнения задач, упомянутых выше. Погрешность представляет собой полную сумму механической и наблюдаемой погрешностей. Механическая погрешность минимальна по сравнению с погрешностью наблюдения, и, выбирая высококачественное оборудование, ею можно пренебречь. Ошибка наблюдения человеческого глаза нуждается в анализе экспериментальных данных для её определения, потому что ее значение может варьироваться, в зависимости от человека-оператора, на нее влияет физическое состояние оператора, например, усталость, острота зрения и др. Кроме того, большую роль в значении погрешности наблюдения играют факторы окружающей среды, такие как

освещение, температура и видимость. Полученные результаты моделирования подтверждают способность достижения желаемой погрешности $error(X_d)$, но не дают полного представления о том, каким может быть значение ошибки при использовании реального прототипа.

Математическая модель предлагаемых реабилитационных систем содержит большое количество параметров, которые оказывают различное влияние на систему. Изучение параметра жесткости k_b также помогает понять, как скольжение опорных стоек на рабочем столе влияет на точность движения инструмента. Использование винтовой передачи с высоким передаточным отношением и с другими заданными параметрами вынудило использовать двигатель постоянного тока MaxonRE 65. Это достаточно тяжелый двигатель, что делает его непригодным для применения в протезах. Замена винтовой передачи на другой механизм может позволить использовать более подходящий двигатель для достижения необходимых технических требований.

Необходима дополнительная работа по изучению реакции системы на тремор (ритмическое трясущееся движение в руке человека) для оценки его влияния на погрешность положения инструмента и точности движения, а также для определения необходимых изменений в системе управления во избежание влияния этого нарушения на систему. Необходимо изучить время задержки реакции человека, которое повлияет на время установления системы.

Заключение

Предоставление возможности вернуться на рынок труда даст людям с ампутированными конечностями мотивацию и возможность продолжать свою нормальную жизнь и поможет им восстановить способность финансово поддерживать себя. Для достижения этой цели предлагается новая система реабилитации. Результаты математического моделирования и моделирования системы управления гарантируют, что человек-оператор сможет управлять системой, будучи частью системы с замкнутым контуром. Также в идеальных условиях можно достичь точности положения инструмента 0,1 мм. Профиль скорости больше подходит, чем ПИД-регулятор, для управления движением инструмента, где время установления меньше и предотвращается перерегулирование.

Библиографический список

1. Ayub R. Evaluation of transradial body-powered prostheses using a robotic simulator / R. Ayub, D. Villarreal, R.D. Gregg, F. Gao // *Prosthetics and Orthotics International*. — 2016. — Т. 41, № 2. — С. 194–200.
2. Belter J.T. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review / J.T. Belter, J.L. Segil, A.M. Dollar, R.F. Weir // *JRRD*. — 2013. — Т. 50, № 5. — С. 599–618.
3. Alshamsi H. Development of a Local Prosthetic Limb Using Artificial Intelligence / H. Alshamsi, S. Jaffar, M. Li // *IJIRCCE*. — 2016. — Т. 4, № 9. — С. 15708–15716.
4. Engdahl, S.M. Surveying the interest of individuals with upper limb loss in novel prosthetic control techniques / S.M. Engdahl, B.P. Christie, B. Kelly [и др.] — Текст: электронный // *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. — 2015. — № 12. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26071402/> (дата обращения: 14.04.2022).
5. Jiralerspong T. Experimental Study of Real-Time Classification of 17 Voluntary Movements for Multi-Degree Myoelectric Prosthetic Hand / T. Jiralerspong, E. Nakanishi, C. Liu, J. Ishikawa // *Applied sciences*. — 2017. — Т. 7, № 11. — С. 1163–1182.
6. Xiloyannis M. Gaussian Process Regression for accurate prediction of prosthetic limb movements from the natural kinematics of intact limbs / M. Xiloyannis, C. Gavriel, A.A.C. Thomik, A.A. Faisa // *7th Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*. — Montpellier, 2015. — С. 659–662.
7. Legrand M. Movement-Based Control for Upper-Limb Prosthetics: Is the Regression Technique the Key to a Robust and Accurate Control? / M. Legrand, M. Merad, E. de Montalivet, A. Roby-Brami, N. Jarrassé // *Frontiers in Neurorobot*. — 2018. — № 12. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2018.00041/full> (дата обращения: 14.04.2022).
8. Smit G. Efficiency of voluntary opening hand and hook prosthetic devices: 24 years of development? / G. Smit, R.M. Bongers, C.K. Van der Sluis, D.H. Plettenburg // *JRRD*. — 2011. — Т. 49, № 4. — С. 523–534.
9. Biddiss E. Upper limb prosthesis use and abandonment: A survey of the last 25 years / E. Biddiss, T.T. Chau // *Prosthetics and Orthotics International*. — 2007. — Т. 49, № 3. — С. 236–257.
10. Gilad I. Micro motion analysis of the human arm, performing with a body powered hook / I. Gilad // *Human Movement Science*. — 1983. — № 2. — С. 133–150.
11. Mabrok, M.A. Human models in human-in-the-loop control systems / M.A. Mabrok, H.K. Mohamed, A. Abdel-Aty, A. Alzahranid // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. — 2020. — Т. 38, — № 1. — С. 2611–2622.
12. Puzi, A.A. Mechanical Impedance Modeling of Human Arm: A survey / A.A. Puzi, S.N. Sidek, F. Sado // *IOP Publishing Ltd*. — 2016. — № 184. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/184/1/012041> (дата обращения: 14.04.2022).

13. Roth N. Mechanical impedance control in the human arm while manually transporting an open-top fluid filled dish / N. Roth, R. Seliktar, J. Mizrahi // Applied Bionics and Biomechanics. — 2007. — № 8. — С. 429–440.

14. Fu M.J. Human-Arm-and-Hand-Dynamic Model with Variability Analyses for a Stylus-Based Haptic Interface / M.J. Fu, M.C. Cavusoglu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics) — 2012. — Т. 42. — № 6. — С. 1633–1644.

15. Chen D. Design and calibration of a six-axis force torque sensor with large measurement range used for the space manipulator / D. Chen, A. Song, A. Li // Procedia Engineering. — 2015. — № 99. — С. 1164–1170.

16. Sensinger, J.W. A Review of sensory feedback in upper-limb prostheses from the perspective of human motor control / J.W. Sensinger, S. Dosen // Frontiers in Neurorobot. — 2020. — № 14. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2020.00345/full> (дата обращения: 14.04.2022).

Берро Сомар — аспирант, ассистент, Высшая школа автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

berro.sppu@bk.ru

Тимофеев Андрей Николаевич — д-р техн. наук, доц., Высшая школа автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

timofeevan@inbox.ru

Berro Somar M. — postgraduate student, Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

berro.sppu@bk.ru

Timofeev Andrey Nikolayevich — D.Sc. of Engineering, associate professor, Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

timofeevan@inbox.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.92:621.45.034

В.В. Атрошенко, В.К. Бердин, Л.А. Таймасова
V.V. Atroshenko, V.K. Berdin, L.A. Taymasova

ВЛИЯНИЕ ЗАСАЛЕННОСТИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ТОЧНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

THE INFLUENCE OF CONTAMINATION OF THE ABRASIVE TOOL ON THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER AND THE ACCURACY PARAMETERS OF THE WORKPIECE

В работе предложен перспективный способ абразивного электрохимического шлифования с периодической очисткой режущего инструмента при получении глубоких, узких, протяженных пазов в образцах из жаропрочного интерметаллидного сплава ВКНА-1В-ВИ. Вопросы обеспечения качества поверхностного слоя и геометрической точности являются актуальными и тесно связаны с обеспечением режущих свойств рабочего инструмента — его засаленностью. Был проведен сравнительный анализ образцов, полученных методом абразивного электрохимического шлифования без периодической очистки и с одновременной периодической очисткой абразивного круга.

The paper proposes a promising method of abrasive electrochemical grinding with periodic cleaning of the cutting tool when obtaining deep, narrow, extended grooves in samples made of heat-resistant intermetallic alloy VKNA-1B-VI. The issues of ensuring the quality of the surface layer and geometric accuracy are relevant and are closely related to ensuring the cutting properties of the working tool – its contamination. A comparative analysis of samples obtained by abrasive electrochemical grinding without periodic cleaning and with simultaneous periodic cleaning of the abrasive wheel was carried out.

Ключевые слова: абразивное шлифование, камера сгорания, жаропрочный интерметаллидный сплав, механическое резание, электрохимическое анодное растворение, электроэрозионная обработка, очистка и правка абразивного инструмента.

Keywords: abrasive grinding, combustion chamber, heat-resistant intermetallic alloy, mechanical cutting, electrochemical anodic dissolution, electroerosion treatment, cleaning and straightening of abrasive tools.

Введение

В современных и перспективных авиационных ГТД предполагается использовать камеры сгорания со сборно-разборной конструкцией жаровой трубы. В качестве конструкционного материала применяется жаропрочный ин-

терметаллидный сплав на основе никеля ВКНА-1В-ВИ, химический состав которого представлен в таблице 1.

Сплав обладает высокими прочностными характеристиками, высокой стойкостью к температурной и химической коррозии, имеет рабочую температуру до 940 °С [1, 2].

Таблица 1. Химический состав интерметаллидного сплава ВКНА-1В

Сплав	Химический состав сплава, масс.%							
	Ni	Al	Ti	Cr	W	Mo	Hf	C
ВКНА-1В	Осн.	8...9	1...3	5...6	2...4	2,5...4,5	0,35	0,04

Применение данного материала позволяет снизить расход воздуха на охлаждение жаровой трубы и повысить КПД двигателя на 3 % [3, 4]. Однако данный материал является труднообрабатываемым, в частности, лезвийными методами обработки. Отмечена высокая трудоемкость выполнения лезвийных операций при низком качестве: ухудшение точности обработки, деформации деталей под воздействием сил резания, повышение температуры в зоне обработки и, как следствие, образование измененного слоя и трещин. Возможна обработка механическим абразивным шлифованием, но т. к. материал обладает высокими адгезионными свойствами, происходит наволакивание и быстрое засаливание абразивного инструмента, что также приводит к образованию измененного слоя и трещин [5–7]. Для решения этих задач целесообразно применение абразивного электрохимического шлифования (АЭХШ). Процесс заключается в одновременном протекании механического резания, электрохимического растворения и электроэрозионных явлений. За счет такой комбинированной обработки происходит снижение усилий резания, повышение производительности, улучшение качества поверхностного слоя [8].

Вместе с тем, в процессе обработки происходит засаливание абразивного инструмента и, как следствие, увеличение сил резания, ухудшение качества поверхностного слоя, поэтому очистка и правка инструмента являются актуальными задачами.

Очистка и правка абразивного инструмента — регламентированный процесс, который производится после обработки определенного количества деталей либо через определенное время обработки. В некоторых случаях засаливание абразивного круга происходит до окончания обработки одной детали. Для обеспечения качества обработки необходимо производить АЭХШ с адаптивным принятием решения об очистке инструмента.

Авторами был разработан способ АЭХШ с возможностью периодической очистки инструмента при обеспечении оптимальных параметров и показателей обработки [9].

Для оценки загрязненности абразивного круга используется косвенный параметр, вычисляемый как отношение усилия резания к длительности фазы электрохимической обработки (ЭХО) за один оборот вращения шпинделя, который сравнивается с заданным значением, где фаза ЭХО — это отношение длительности короткого замыкания к периоду обращения шпинделя [10].

При проведении исследований производилась обработка образцов деталей из интерметаллидного

сплава ВКНА-1В-ВИ. Выполнили обработку пазов длиной $174,5 \pm 0,2$ мм, шириной $1,75 \pm 0,15$ мм, глубиной $5 \pm 0,2$ мм.

Абразивное электрохимическое шлифование осуществлялось на станке Naromat PRO100, который был модернизирован и укомплектован источником технологического тока Пульсар Смарт 500/12 и дополнительным электродом-инструментом для проведения очистки абразивного инструмента.

Электролит для обработки представлял собой водный раствор 6 % NaNO_3 , 0,5 % NaNO_2 , 0,5 % Na_2CO_3 , 2 % глицерина. Плотность электролита составляла величину $\rho = 1,07\text{--}1,06$ г/см³. Скорость рабочей подачи была выбрана 20 мм/мин, частота вращения круга — 2800 об/мин, рабочее напряжение 8В, рабочий ток 100...120 А. На дополнительный электрод для очистки подавалось напряжение 15 В, средний ток составлял 10 А, межэлектродный зазор составлял 0,05 мм. В качестве инструмента для электрохимического алмазного шлифования использовали абразивный круг на металлической связке марки AC20 $150 \times 32 \times 1,7 \times 5$ 160/125 100 M2-02 575.

Запись электрических параметров производилась при помощи цифрового осциллографа RIGOL DS 1104 Z, загрязненность абразивного круга контролировалась без снятия круга при помощи переносного цифрового микроскопа «Микмед-5.0». Количественный анализ химического состава в поверхностном слое образцов определялся на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6490 LV.

При выполнении экспериментальных работ рассматривались технологические возможности глубоких, узких, протяженных пазов в деталях ГТД из жаропрочного сплава методом абразивного электрохимического шлифования.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлены фотографии периферийной поверхности алмазного круга в исходном состоянии.

Поверхность круга в исходном состоянии имеет ровную, четкую форму, на поверхности можно видеть так называемые «следы комет», цвет круга имеет красноватый медный оттенок с блеском, без включений других металлов, химический состав поверхности чистого круга представлен большим количеством фаз углерода — алмазных зерен и медно-оловянной связки.

Результаты микро-рентгено-спектральных исследований поверхности алмазного круга в исходном состоянии представлены на рисунке 1 и в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав поверхности алмазного круга в исходном состоянии

Элемент	C	Cu	O	Sn
Содержание, %	33,13	45,81	11,63	9,43

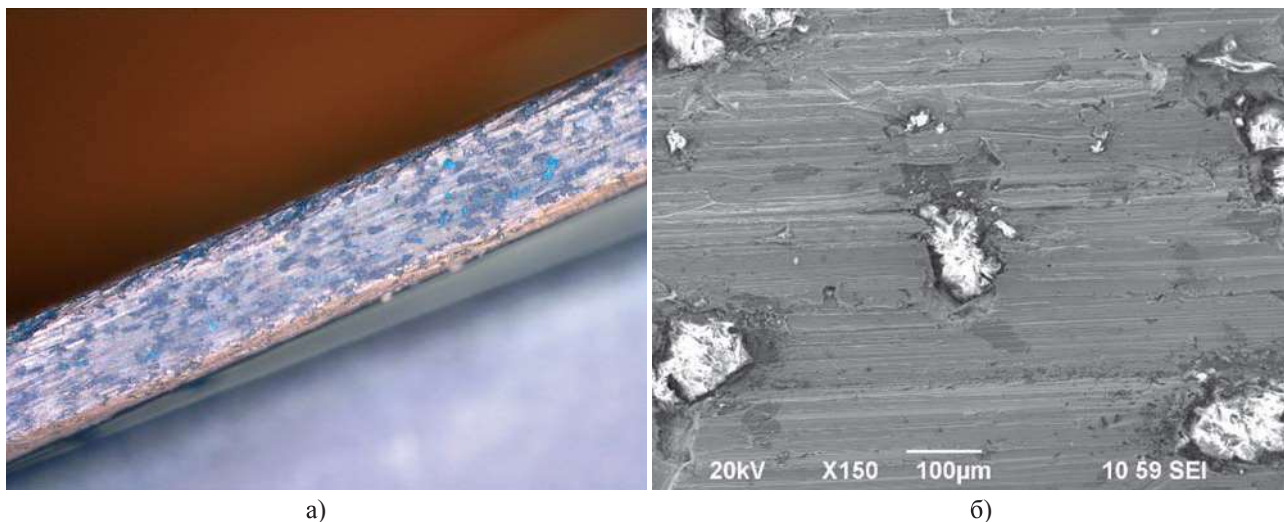


Рис. 1. Поверхность нового алмазного круга:
а — увеличение x10; б — увеличение x150

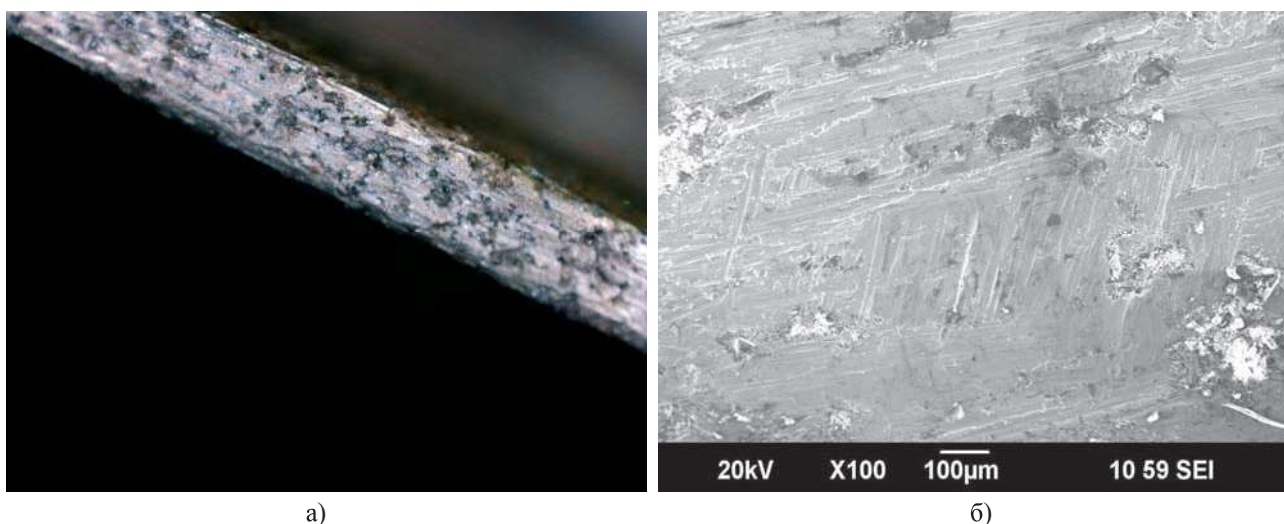


Рис. 2. Поверхность круга после абразивного шлифования ($V = 20$ мм/мин):
а — увеличение x10; б — увеличение x100

При обработке интерметаллидных сплавов методом алмазного шлифования (рис. 2) происходит быстрое наволакивание материала на абразивный круг, а также скругление режущей торцевой кромки круга.

Поверхность круга после засаливания выглядит гладкой, с выраженным серым металлическим блеском, химический состав поверхности инструмента после абразивного электрохимического шлифования

представлен большим количеством различных элементов, которые являются химическими составляющими обрабатываемого материала, такими как никель 30%, алюминий 10,5%, хром 3%, титан 2% и основной элемент инструмента — медь 15%.

Результаты микро-рентгено-спектральных исследований поверхности алмазного круга после АЭХШ представлены на рисунке 2 и в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав круга после АЭХШ

Элемент	C	O	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu
Содержание, %	0	20.48	10.52	2.45	1.15	2.16	1.35	2.35	2.15	3.0	9.09	30.27	15.03

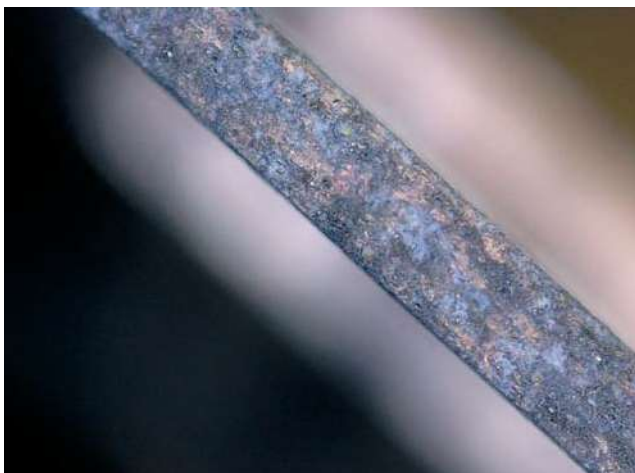


Рис. 3. Поверхности алмазного круга после АЭХШ ($V = 20$ мм/мин)

При дальнейшей обработке на засаленном абразивном инструменте интенсифицируются электроэрозионные процессы, которые способствуют самоочистке круга (рис. 3, 4).

С увеличением скорости рабочей продольной подачи происходило увеличение усилия резания, термосилового воздействия в зоне резания и величины среднего тока, периферийная поверхность алмазного круга представлена на рисунке 5. Можно наблюдать темный цвет от нагара из-за мощного электроэрозионного процесса, который сопровождался увеличением

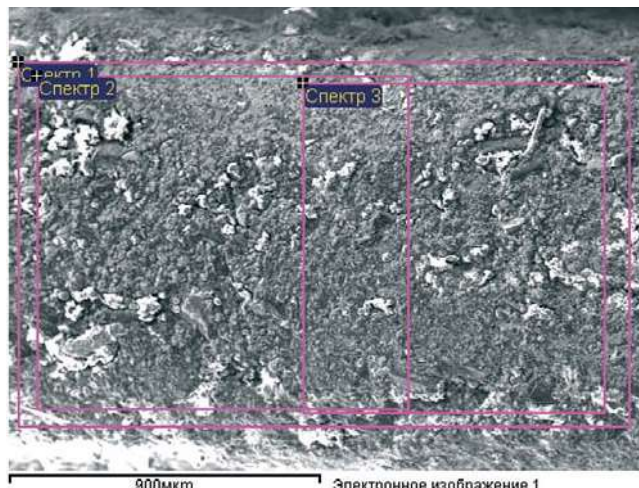


Рис. 4. Поверхность круга после ЭЭО самоочистки ($V = 20$ мм/мин)

температуры в зоне резания до 700°C . Поле электроэрозионной самоочистки круга химический состав на поверхности изменился: элементы обрабатываемого материала, такие как никель с 30% до 11%, алюминий с 10,5% до 3%, хром с 3% до 0,76%, титан с 2% до 1,5% и основные элементы инструмента — медь с 15% до 34%, углерод 27%.

Результаты микро-рентгено-спектральных исследований поверхности алмазного круга после электроэрозионной самоочистки представлены на рисунке 5 и в таблице 4.

Таблица 4. Химический состав круга после ЭЭО самоочистки

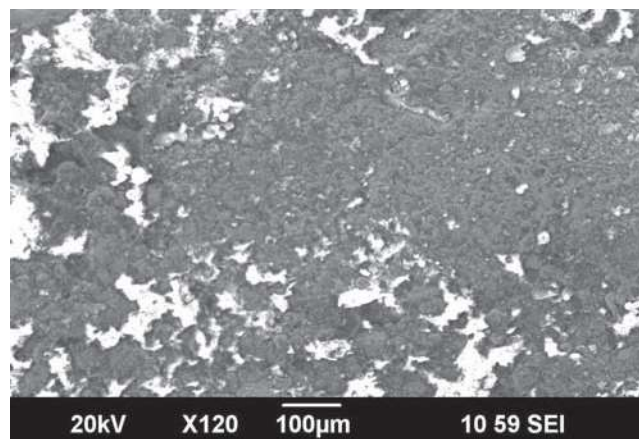
Элемент	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Sn
Содержание, %	27.06	10.13	3.08	1.24	0.72	1.77	1.51	0.76	2.62	11.39	34.52	5.2

Микроструктура образца (рис. 6) имеет дендритное строение, в междендритных участках расположены частицы γ' — фазы с размерами 30–40 мкм, окруженные прослойками γ — твердого раствора [11].

Исследования микроструктуры поверхностного слоя обрабатываемого образца показали, что в поверхностном слое материала образца наблюдается измененный слой величиной до 20 мкм.



а)



б)

Рис. 5. Поверхность алмазного круга после АЭХШ ($V = 60$ мм/мин): а) увеличение $\times 10$, б) увеличение $\times 100$

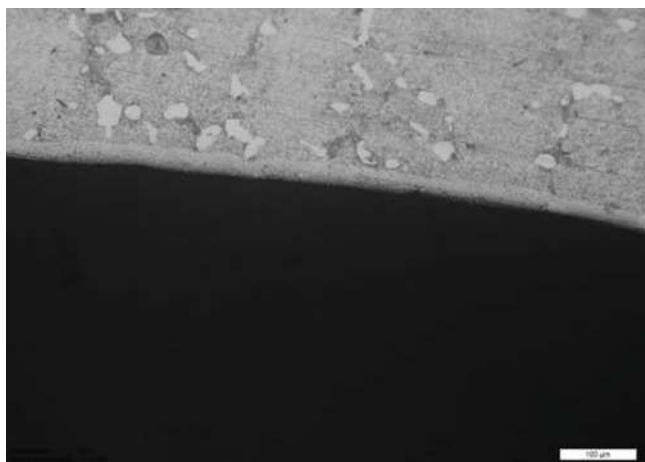


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя образца детали после абразивного электрохимического шлифования (увеличение $\times 100$)

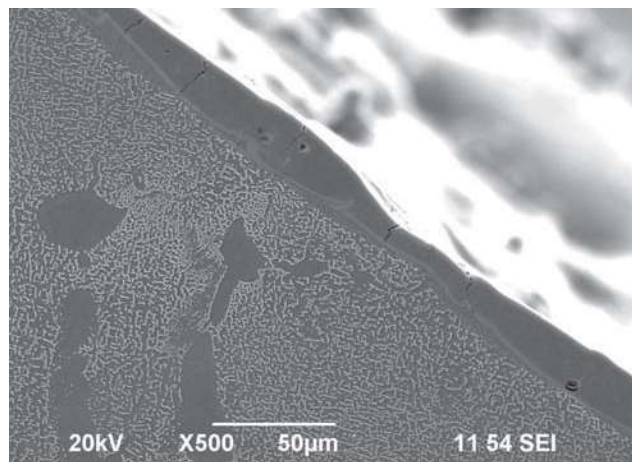


Рис. 7. Микротрещины в поверхностном слое образца (увеличение $\times 500$)

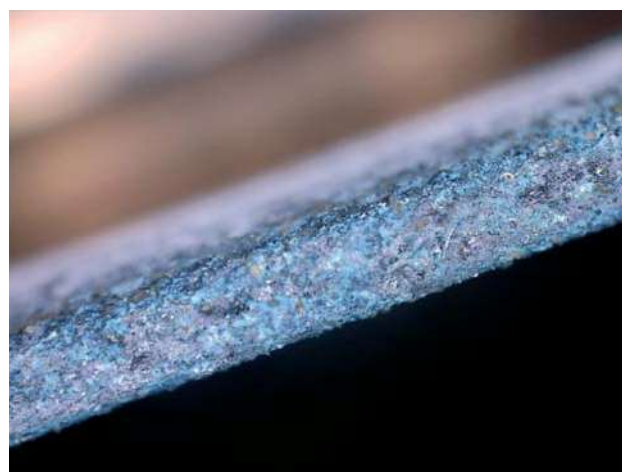
На радиусе скругления у основания паза локально были обнаружены микротрещины глубиной до 25 мкм (рис. 7).

Исследования геометрических параметров паза после АЭХШ (рис. 8) выявили, что ширина паза составила 1,8...2,05 мм, наблюдается разница ширины паза по глубине.

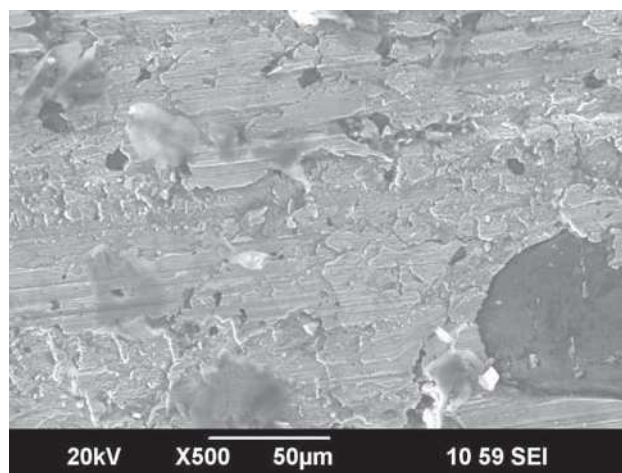
На рисунке 9 показана поверхность абразивного круга после обработки на скорости рабочей подачи 60 мм/мин с очисткой дополнительным электродом предложенным методом.



Рис. 8. Продольный паз в детали сегмент жаровой трубы камеры сгорания ГТД после АЭХШ



а)



б)

Рис. 9. Поверхность алмазного круга при АЭХШ с очисткой дополнительным электродом, скорость рабочей подачи 60 мм/мин: а) увеличение $\times 10$, б) увеличение $\times 500$

Поверхность имеет красноватый медный оттенок с серыми включениями никеля. При этом усилие резания находится в допустимых пределах (момент на электродвигателе шпинделя до 50% от номинального значения), электроэрозионные процессы составляли

порядка 20...30%. Химический состав на поверхности изменился: элементы обрабатываемого материала такие как никель с 30% до 2,4%, алюминий с 10,5% до 0,9%, хром с 3% до 0,46%, титан с 2% до 1% и основные элементы инструмента — медь с 15% до 52%, углерод 37%.

Таблица 5. Химический состав круга после АЭХШ с периодической очисткой

Элемент	C	O	Al	Cl	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Sn
Содержание, %	37.7	2.15	0.91	0.58	0.8	1.09	0.46	1.44	2.4	52.01	0.46

Результаты микро-рентгено-спектральных исследований алмазного круга АЭХШ с очисткой дополнительным электродом представлены на рисунке 9 и в таблице 5.

На рисунке 10 представлена гистограмма содержания химических элементов на поверхности алмазного круга при различных состояниях.

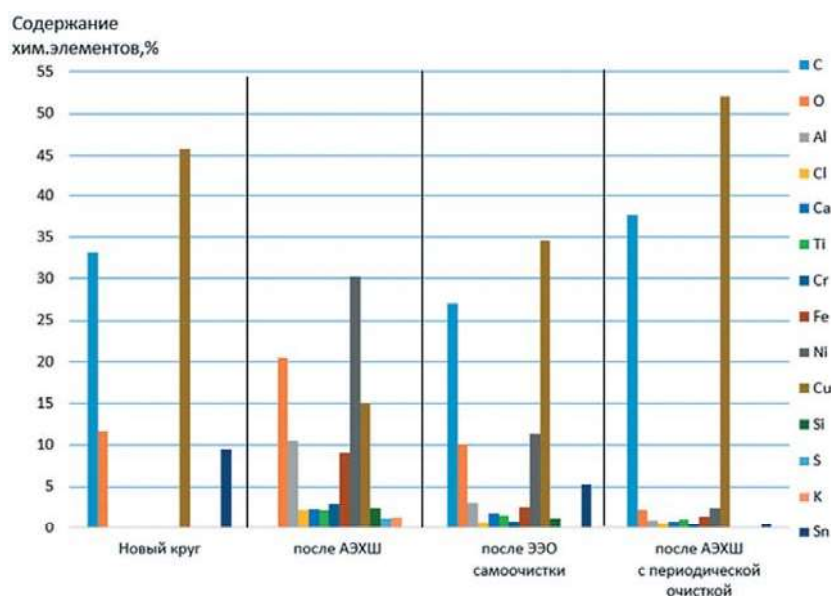


Рис. 10. Содержание химических элементов на поверхности алмазного круга при различных состояниях

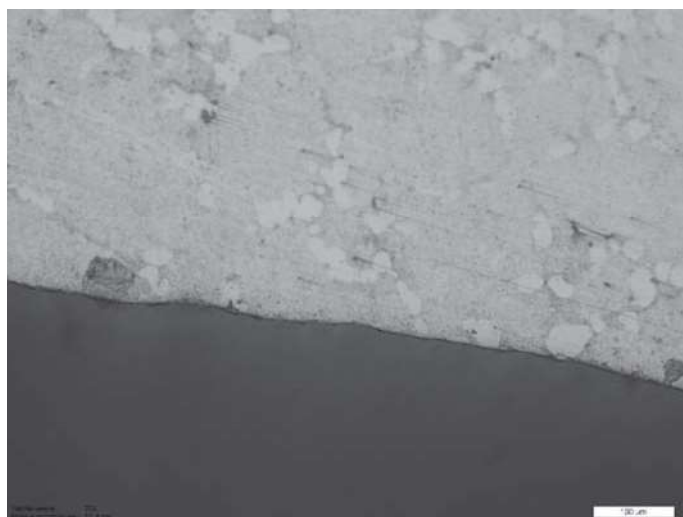


Рис. 11. Микроструктура поверхностного слоя образца детали после абразивного электрохимического шлифования с периодической очисткой (увеличение x100)



Рис. 12. Продольный паз в детали сегмент жаровой трубы камеры сгорания ГТД после АЭХШ с периодической очисткой

После обработки АЭХШ с периодической очисткой абразивного инструмента микроструктура образца (рис. 11) имеет дендритное строение, в междендритных участках расположены частицы γ' — фазы с размерами 30–40 мкм, окруженные прослойками γ — твердого раствора [11]. В поверхностном слое материала детали измененный слой, прижоги, трещины не наблюдаются.

Применение предложенного способа АЭХШ с периодической очисткой абразивного круга (рис. 12) позволило получить паз с требуемыми показателями точности — ширина паза составила 1,73...1,78 мм по всей длине и глубине паза.

Выводы

Самоочистка инструмента электроэрозионным методом возможна только до определенного предела, после которого начинается отрицательное влияние очистки на состояние поверхностного слоя.

При периодической очистке предложенным способом на поверхности инструмента наблюдается удаление наволоченного материала объемом в 5–7 раз больше, чем при электроэрозионной самоочистке, на поверхности образца наблюдаются выступающие из медной связки абразивные зерна. Качество поверхностного слоя, геометрическая точность соответствуют требованиям конструкторской и технологической документации.

Библиографический список

1. Базылева О.А. Влияние высокотемпературного отжига на структуру и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al / О.А. Базылева [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2016. № 1 (106). С. 112–122.
2. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А. Новый литейный сплав ВКНА-1В // Авиационная промышленность. 1991. № 12. С. 39–40.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. М.: Машиностроение, 2007. — Т. 2. — 396 с. ил.
4. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД / А.Е. Кишалов [и др.] // Молодой ученый. 2012. № 11. С. 52–60.
5. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
6. Хрульков В.А. Шлифование жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1964. — 190 с.
7. Казаков В.Ф. Шлифование при повышенных скоростях резания. Киев: Техника, 1971. — 172 с.
8. Афанасьева И.А., Юрьев В.Л. Исследование влияния режимов электрохимического алмазного шлифования на качество рабочих поверхностей щеточных уплотнений // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 4 (49). С. 30–35.
9. Пат. 2607060 Российская Федерация, МПКВ 23 Н 5/06. Способ алмазно-электрохимического шлифования / Р.Х. Ганцев, В.Э. Галиев, А.Д. Мингажев, А.П. Семашко, Л.А. Галимова, М.В. Ватуев, Р.Д. Агзамов; заявители и патентообладатели Р.Х. Ганцев, В.Э. Галиев, А.Д. Мингажев. — № 2015141299/16; заявл. 29.09.15; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1.
10. Таймасова Л.А., Галиев В.Э., Атрощенко В.В. Обеспечение точностных параметров и качества поверхностного слоя при получении глубоких пазов в деталях камеры сгорания ГТД методом абразивного электрохимического шлифования // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 4 (90). С. 10–16.
11. Базылева О.А., Бунтушкин В.П., Тимофеева О.Б., Морозова Г.И., Воронцов М.А. Исследование микроструктуры интерметаллидного сплава ВКНА 1В после высокотемпературных нагревов и испытаний на длительную прочность // Авиационные материалы и технологии. 2008. №2. С. 15–19.

References

1. Bazyleva O.A., et al., “Effect of high-temperature annealing on structure and properties of Ni₃Al intermetallic compound in alloys, (in Russian), in Vestnik MGTU im. N. E. Bauman, no. 1 (106), pp. 112–122, 2016.
2. Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A., “New casting alloy VKNA-1V”, (in Russian), in Aviacionnayapromy’shennost, no. 12, pp. 39–40, 1991.
3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L., Fundamentals of designing aircraft engines and power plants: A textbook, (in Russian). Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 2007.
4. Kishalov A.E., et al., “Analysis of Loads Acting on GTE Structural Elements”, (in Russian), in Molodojuchenyj, no. 11, pp. 52–60, 2012.
5. Maslov E.N., Theory of grinding material, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1974.
6. Khrulkov V.A., Grinding of heat-resistant alloys, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1964.
7. Kazakov V.F., Grinding at high cutting speeds, (in Russian). Kiev: Technika, 1971.
8. Afanasyeva I.A., Yur'ev V.L., “Investigation of the influence of modes of electrochemical diamond grinding on the quality of working surfaces of brush seals”, (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 16, no. 4 (49), pp. 30–35, 2012.
9. Pat. 2607060 Russian Federation, IPC B 23 N 5/06. Method of diamond electrochemical grinding. / R.Kh. Gantsev, V.E. Galiev, A.D. Mingazhev, A.P. Semashko, L.A. Galimova, M.V. Vatuiev, R.D. Agzamov; applicants and patent holders R.H. Ganev, V.E. Galiev, A.D. Mingazhev. — No. 2015141299/16; application 29.09.15; publ. 10.01.17, Bul. No. 1.

10. Taimasova L.A., Galiev V.E., Atroshenko V.V. Confidence of accuracy parameters and quality of the surface layer at receipt of deep groove in details of the combustion chamber of a gas turbine engines by method of abrasive electrochemical grinding, (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 24, no. 4 (90), pp. 10–16, 2020.

11. Bazileva O.A., Buntushkin V.P., Timofeeva O.B., Morozova G.I., Vorontsov M.A. Investigation of the microstructure of the intermetallic alloy VKNA 1B after high-temperature heating and long-term strength tests // Aviation materials and technologies. № 2, pp. 15–19. 2008.

Атрощенко Валерий Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий ФГБОУ ВО «УГАТУ»

acstsufa@mail.ru

Бердин Валерий Кузьмич — канд. техн. наук, научный руководитель НПА «Технопарк АТ», доц. кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «ГНТУ»

berdinvk@mail.ru

Таймасова Лилия Альбертовна — ведущий инженер-технолог НПА «Технопарк АТ»

lagalimova@yandex.ru

Atroshenko Valeriy Vladimirovich — D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of «Welding, foundry and additive technologies» of USATU

acstsufa@mail.ru

Berdin Valeriy Kuzmich — scientific adviser SPA “Technopark AT”, associate professor at the department of «Technological machines and equipment» of USPTU

berdinvk@mail.ru

Taimasova Lilia Albertovna — leading engineer-technologist of SPA “Technopark AT”

lagalimova@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

EFFICIENCY OF APPLICATION AND DETERMINATION OF THE CUTTING CAPACITY OF A CARBIDE TOOL IN THE PROCESSING OF TITANIUM ALLOYS

Описан процесс получения тонких стружек за счет финишного фрезерования титановых сплавов. Проведены расчеты максимальной толщины стружки, зависимости угла дуги от подачи на зуб, угла сдвига при обработке. Данные расчеты позволяют определить зависимость точности получаемых размеров от глубины резания, а также эффективность применения и режущую способность твердосплавного инструмента для обработки титановых сплавов.

The process of obtaining thin chips due to the finishing milling of titanium alloys is described. Calculations of the maximum chip thickness, the dependence of the arc angle on the feed to the tooth, the shear angle during processing are carried out. These calculations allow us to determine the dependence of the accuracy of the obtained dimensions on the cutting depth, as well as the efficiency of application and cutting ability of a carbide tool for processing titanium alloys.

Ключевые слова: фрезерование, титановые сплавы, тонкие стружки, режущая способность.

Keywords: milling, titanium alloys, fine chips, cutting ability.

Главной особенностью финишного фрезерования является формирование тонких стружек, соотносимых по толщине с остротой режущего инструмента. При этом известно, что встречное и попутное фрезерование имеет особенность изменения толщины стружки по ее длине, от нуля до максимума и от максимума до нуля соответственно. Для анализа и описания физических явлений, происходящих в контактной зоне стружкообразования при финишном фрезеровании, необходимо ввести ряд показателей, отражающих специфику рассматриваемого процесса, которые позволили бы более четко и ясно представить механизм взаимодействия лезвия режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Процесс стружкообразования рассматривается непосредственно в зоне контакта режущей кромки зуба фрезы (рис. 1).

Толщина стружки h меняется по ее длине:

- при попутном фрезеровании

$$h_i = \int_{\psi}^0 S_z \cdot \sin(d\psi),$$
- при встречном фрезеровании

$$h_i = \int_0^{\psi} S_z \cdot \sin(d\psi),$$

где S_z — подача на зуб, мм, d — диаметр фрезы, мм, ψ — угол дуги контакта, град.

При этом угол дуги контакта:

$$\psi = \arccos\left(\frac{d-2t}{d}\right),$$

где t — глубина резания, мм.

Исходя из схемы формирования стружки и представленных зависимостей на определенном угле дуги контакта ψ толщина стружки h станет равна остроте

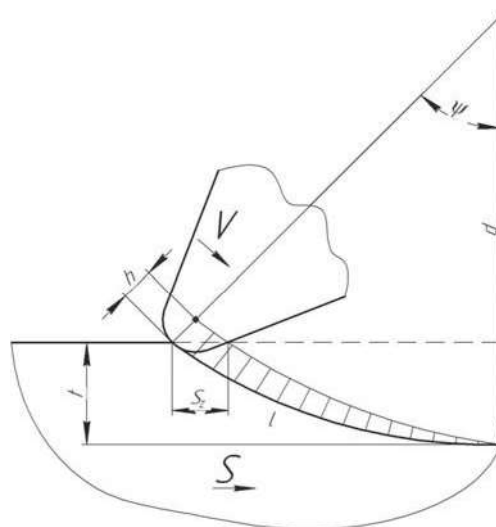


Рис. 1. Схема формирования стружки

лезвия зуба фрезы, характеризуемой условным вписанным радиусом округления лезвия ρ . После чего при дальнейшем уменьшении толщины стружки сформируются условия для «выглаживания», при котором резания, то есть формирования стружки не происходит.

Рассматривая попутное фрезерование при $d = 2$ мм, $t = 0,1$ мм, получим угол дуги $\psi = 0,451$ рад (25,86 град). Максимальная толщина стружки h , зависящая от подачи на зуб S_z , будет иметь значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Максимальная толщина стружки

Подача на зуб S_z , мкм	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
Максимальная толщина стружки h , мкм	9,0	8,1	7,2	6,3	5,4	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9

Угол дуги, при котором формируются данные условия ($h = \rho$), можно определить по зависимости:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\rho}{S_z}\right).$$

Исходя из изложенного, наибольший интерес представляет зона резания с толщиной стружки, соизмеримой и менее остроты режущего инструмента, то есть $\rho = 4,6...7,2$ мкм, примем $\rho = 5,9$ мкм. Расчеты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость угла дуги от подачи на зуб

	В пределах дуги контакта				За пределами дуги контакта				Некорректно	
Подача на зуб S_z , мкм	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
ψ , рад	0,299	0,334	0,378	0,435	0,514	0,631	0,829	1,388	–	–
ψ , град	17,2	19,1	21,6	24,9	29,5	36,2	47,5	79,6	–	–

Исходя из расчетных данных, толщина стружки, имеющая значения больше чем значение остроты лезвия $\rho = 5,9$ мкм, формируется при подаче на зуб $S_z = 20$; 18; 16 и 14 мкм, а значения меньше значения остроты — при подаче на зуб $S_z = 12$; 10; 8 и 6 мкм, при подаче на зуб $S_z = 4$ и 2 мкм расчет некорректный. Для дальнейших расчетов приняты значения подачи на зуб $S_z = 20$; 18; 16 и 14 мкм.

Разделение материала в процессе обработки происходит за счет силы резания, зависящей от множества факторов, таких как: толщина срезаемого слоя, физико-механические свойства обрабатываемого материала, параметры характеризующие металлорежущий инструмент и т.д. Поскольку на процесс стружкообразования уходит примерно 90% силы резания, то изучение существующих схем и моделей стружкообразования для зоны установившегося резания является важной составляющей в разработке модели процесса микрорезания [1–6].

Авторы использовали различные подходы к рассмотрению моделей процесса резания. Так, например, в 1941 г. Эрнст и Мерчант предлагают модель, в которой рассматривают инструмент как абсолютно острый клин, считают деформацию металла плоской, исключают скольжение между инструментом и заготовкой,

а также основывают свою теорию на том, что напряжения в плоскости сдвига распределяются равномерно.

Особенностью данной модели, является то, что она опирается на математическое описание равновесия сил, приложенных к стружке в плоскости сдвига и к передней поверхности режущего клина в зоне контакта со стружкой (рис. 2), а также не учитывает теорию пластичности и не определяет напряжения в зоне контакта.

Данный метод позволяет найти закономерность для определения угла сдвига материала:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\cos \gamma}{K_c - \sin \gamma}\right),$$

$$\text{где } K_c = \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\sin \varphi}.$$

Однако позднее было установлено, что данная формула применима лишь для пластиков.

В 1951 г. Ли и Шафер, основываясь на методе линий скольжения, предложили подход, в котором рассматривали жесткопластический материал с точки зрения распределения напряжений, опираясь на то, что при больших деформациях интенсивность упрочнения незначительна, а значит напряжение текучести

практически постоянно. Подобный подход использовал М.И. Клушин в 1958 году [7], а также Кравченко Б.А. [8] и Розенберг А.М. [9, 10].

В работе рассматривается схема обработки, учитывающая радиус округления лезвия (рис. 3).

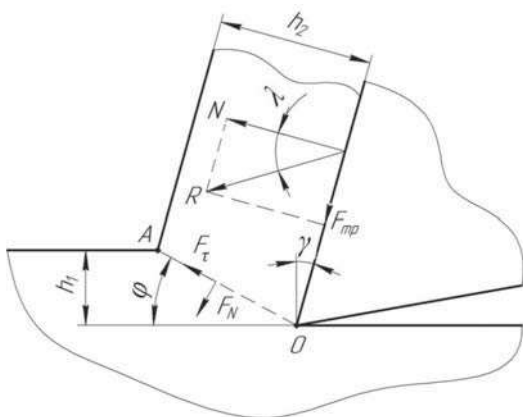


Рис. 2. Схема резания Эрнст и Мерчант:

F_{mp} – сила трения между передней поверхностью и стружкой, N – сила, нормальная к контактной поверхности стружки и режущего клина, F_N и F_{mp} – нормальная и тангенциальная составляющие силы на плоскости сдвига OA , R – результирующая сила, φ – угол наклона плоскости сдвига, λ – угол трения, γ – передний угол инструмента, h_1 – глубина резания, h_2 – толщина стружки

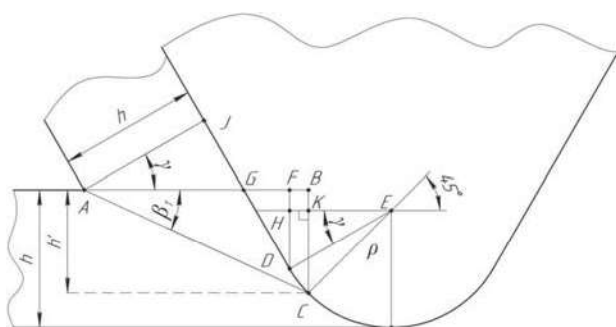


Рис. 3. Рассматриваемая схема резания

Для расчета угла сдвига β_1 из треугольника AJG находим $AG = \frac{h}{\cos \gamma}$, из треугольника GFD

находим $GF = \tan \gamma * DF = \tan \gamma * (h - \rho + \rho * \sin \gamma)$, $FB = HK = HE - KE = \rho * (\cos \gamma - \sin 45)$, $BC = BK + KC = h - \rho + \rho * \sin 45$, с помощью полученных зависимостей из треугольника ABC получим:

$$\beta_1 = \arctg \left[\frac{(h - \rho + \rho * \sin 45) * \cos \gamma}{h + \sin \gamma (h - \rho + \rho * \sin \gamma) + \rho * \cos^2 \gamma - \rho * \sin 45 * \cos \gamma} \right]$$

Рассматривая условия резания при которых $h = \rho$, угол сдвига:

$$\beta_1 = \frac{\sin 45 * \cos \gamma}{2 - \sin 45 * \cos \gamma}$$

По результатам построения схем резания можно сделать вывод, что при малых толщинах срезаемого слоя наибольшее влияние на угол сдвига оказывает условный вписанный радиус округления лезвия. Отрицательный передний угол оказывает сильное влияние на угол сдвига при толщинах срезаемого слоя, значительно больших по сравнению с острой лезвия.

Проведен эксперимент по установлению действительной толщины срезаемого слоя на координатно-расточном станке. Обработка производилась с помощью фрезы с передним углом $\gamma = -30^\circ$ и углом подъема винтовой канавки 30° . Поверхность пластины из материала ВТ1-00 была предварительно обработана для получения «нулевой» площадки, а затем происходило поэтапное снятие материала с глубинами резания 100, 75, 50, 25, 15, 8, 4, 2 и 1 мкм (рис. 4), длина каждого обработанного участка составляла 10 мм. На контрольно-измерительной машине Латик КИМ-1000 [11] произведены измерения действительной толщины срезаемого слоя. Результаты измерений представлены в таблице 3.

В результате проведенных испытаний получены зависимости отклонений получаемых размеров от глубины резания (рис. 5).

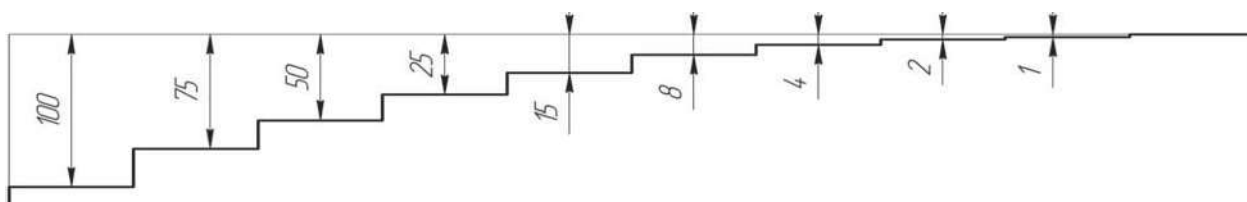


Рис. 4. Схема резания при определении фактической глубины резания

Таблица 3. Теоретическая и фактическая глубина резания

№	Теоретическая глубина резания, мкм	100	75	50	25	15	8	4	2	1
1	Фактическая глубина резания при $\rho = 6,3$ мкм	80	61	41	21	13	7	6	4	x
	Относительное отклонение, %	20,0	18,7	18,0	16,0	13,3	12,5	-50,0	-100,0	-100,0
2	Фактическая глубина резания при $\rho = 14,5$ мкм	85	65	44	22	14	13	9	x	x
	Относительное отклонение, %	15,0	13,3	12,0	12,0	6,7	-62,5	-125,0	-125,0	-125,0

«x» — резания не происходит

Несмотря на полученные отклонения, в представленном диапазоне обрабатываемых глубин все результаты по классам точности не хуже IT9, однако наилучшие результаты получены при глубинах резания $t = 2, 4, 8$ и 15 мкм при $\rho = 6,3$ мкм, и $t = 15$ и 25 мкм при $\rho = 14,5$ мкм, но по относительному отклонению $t = 8$ и 15 мкм при $\rho = 6,3$ мкм, и $t = 15, 25$ и 50 при $\rho = 14,5$ мкм.

Анализ полученных результатов позволил выработать рекомендации для получения требуемой точности, при которой рекомендуется производить

обработку при соотношении $t/\rho = 1...3$. Также для подтверждения работоспособности разработанного режущего инструмента и определения рациональных режимов обработки проведены натурные испытания при обработке титанового сплава BT1-00 при различных толщинах срезаемого слоя. Испытания проводились при режимах и параметрах, приведенных в табл. 4. Обеспечение требуемой толщины срезаемого слоя h производилось за счет подачи на зуб S_z при остроте режущего инструмента $\rho = 6,3$ мкм.

Таблица 4. Параметры испытаний

Подача на зуб, S_z , мкм	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
Глубина, t , мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Угол, рад	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Угол, град	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86
Толщина, h , мкм	13,23	7,85	6,97	6,10	5,23	4,36	3,49	2,62	1,74	1,32
h/r	2,10	1,25	1,11	0,97	0,83	0,69	0,55	0,42	0,28	0,21
Формирование стружки	++	++	++	++	+	+	+–	+–	+–	—

Испытания позволили установить, что резание отсутствует при значении коэффициента режущей способности $K_p = h/\rho < 0,25...0,28$ (рис. 5), при этих условиях обработки происходит царапание и вдавливание обрабатываемого материала.

При коэффициенте режущей способности $K_p = 0,25...0,5$ наблюдается формирование стружки в условиях нестабильного резания, при дальнейшем повышении коэффициента режущей способности происходит стабилизация процесса резания, что можно объяснить формированием на лезвии режущего инструмента застойной зоны, изменяющей фактически передний угол

и расположение точки разделения. Как видно из полученных результатов проведенных испытаний фрез, стабильное формирование стружки достигается при толщине срезаемого слоя, соизмеримой с остротой лезвия, то есть $h = \rho$ и дальнейшем увеличении коэффициента режущей способности до $K_p = h/\rho = 2$. Поэтому исходя из расчетов и проведенных испытаний для минимизации толщины дефектного слоя и надежного обеспечения размерной точности в пределах $15...25$ мкм (IT 8...9) рекомендуется применение твердосплавного режущего инструмента с соответствующей остротой лезвия (порядка $\rho = 7-10$ мкм) при режимах резания: скорость резания $V = 28...56$

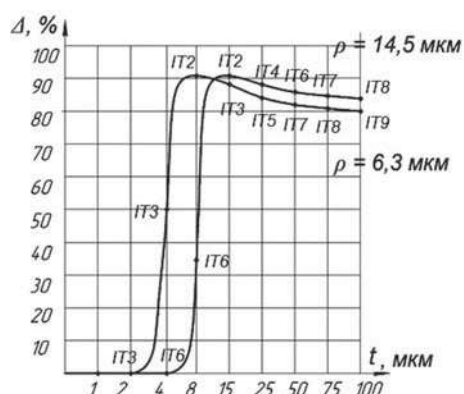


Рис. 5. График зависимости точности получаемых размеров от глубины

м/мин; подача на зуб $S_z = 14 \dots 20$ мкм/зуб; глубина резания менее $t = 0,1$ мм, которые позволят обеспечить толщину срезаемого слоя $h = 7 \dots 13$ мкм.

Направление силы сдвига и положение точки разделения имеет решающее значение для формирования стружки и обработанной поверхности. Исследования, представленные в данной работе, устанавливают угол сдвига β_1 и коэффициент режущей способности K_p , характеризующийся отношением толщины срезаемого слоя к радиусу округления лезвия режущего инструмента h/ρ , при которых:

- возникают минимально возможные условия для формирования стружки, то есть возникновения резания — $\beta_1 = 0^\circ$, $K_p = 0,2929$;

- возникают стабильные условия для формирования стружки — $\beta_1 \geq 11^\circ$, $K_p \geq 0,4035$.

Увеличение коэффициента режущей способности K_p до значений $h/\rho \sim 1$ приводит к увеличению угла сдвига β_1 до значений порядка $23^\circ \dots 24^\circ$, дальнейшее увеличение коэффициента режущей способности не приводит к значительному увеличению угла сдвига. Предельно допустимые значения толщины срезаемого слоя h , при которых будет реализовано нормальное резание, можно установить практическим путем. При этом превышение допустимых значений толщины срезаемого слоя приводит как к повышению равнодействующей силы R резания, так и радиуса округления лезвия из-за недопустимых нагрузок. На практике установлено, что при превышении коэффициента режущей способности $K_p \geq 10$ радиус округления лезвия пропорционально увеличивается за счет изнашивания режущего клина.

Балова Дарья Георгиевна — ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ
rvbd@mail.ru

Balova Darya Georgievna — assistant of the sub-department of “Metal cutting machines and tools” of OSTU
rvbd@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Bao, W. Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model / W. Bao, I. N. Tansel. — DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00054-7 // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — Vol. 40, no. 15. — P. 2155–2173.
2. Bao, W. Modeling micro-end-milling operations. Part II: tool run-out / W. Bao, I. N. Tansel. — DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00055-914 // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2000. — Vol. 40, no. 15. — P. 2175–2192.
3. Bao, W. Modeling micro-end-milling operations. Part III: influence of tool wear / W. Bao, I.N. Tansel. — DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00056-0 // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2000. — Vol. 40, no. 15. — P. 2193–2211.
4. Investigation of the dynamics of micro-endmilling. Part I: Model development / M.B. Jun, X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor. — DOI: 10.1115/1.2193546 // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2006. — Vol. 128, no. 4. — P. 893–900.
5. Mechanistic modelling of the micro end milling operation / L. Uriarte, S. Azcarate, A. Herrero [et al.]. — DOI: 10.1243/09544054JEM837 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. — 2008. — Vol. 222, no. 1. — P. 23–33.
6. Vogler, M.P. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling. Part I: Surface generation / M.P. Vogler, R.E. DeVor, S.G. Kapoor. — DOI: 10.1115/1.1813470 // Journal of Manufacturing Science Engineering. — 2005. — Vol. 126, no. 4. — P. 685–694.
7. Клушин М.И. Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя. М., 1953. — 228 с.
8. Кравченко Б.А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. Куйбышев. 1962. 177 с.
9. Розенберг А.М. Динамика фрезерования. М.: Советская наука, 1945. — 360 с.
10. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. Свердловск, 1956.
11. Координатная измерительная машина КИМ-1000. — URL: <https://lapic.ru/produkcziya/koordinatno-izmeritelnaya-mashina-kim-1000/> (дата обращения: 07.09.2020).

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

INCREASING THE LIFETIME OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR HIGH-TEMPERATURE HEAT TREATMENT

Условия эксплуатации высокотемпературной термической оснастки: высокие температуры, термоциклические нагрузки, коррозия вследствие воздействия нагревательных и охлаждающих сред. Сплавы на основе хрома сочетают жаропрочность, жаростойкость и сопротивление термоциклическим нагрузкам, их применение обеспечивает высокую стойкость оснастки.

Operating conditions of high-temperature thermal equipment: high temperatures, thermal cycling loads, corrosion due to exposure to heating and cooling media. Chromium-based alloys combine heat resistance, heat resistance and resistance to thermal cycling, their use provides high tool life.

Ключевые слова: высокотемпературная термическая оснастка, жаропрочность, жаростойкость, термоциклические нагрузки, сплав на основе хрома.

Keywords: high temperature thermal tooling, heat resistance, thermal cycling loads, chromiumbased alloy.

Введение

При проведении термической обработки оснастка (поддоны, решетки, плиты и т.д.), в которой размещаются обрабатываемые детали, может находиться под воздействием высоких температур (например, температуры закалки быстрорежущих сталей 1200–1300°C). При высоких температурах и длительных выдержках пределы прочности и текучести металла снижаются, может развиваться ползучесть и, как следствие, значительная деформация или разрушение оснастки (частичное — трещины, или полное с разделением на несколько частей), не позволяющая ее дальнейшую эксплуатацию.

Периодические перепады температуры (при переносе садки из закалочной среды в охлаждающую среду) и те же циклы термической обработки следующих партий заготовок вызывают термические напряжения.

Нагревательные и охлаждающие среды могут быть агрессивными (расплавы солей, селитры, щелочи) — это создает для оснастки опасность возникновения коррозии, ускоряющейся при высоких температурах.

Таким образом, металл, из которого изготавливают высокотемпературную термическую оснастку, эксплуатируется в тяжелых условиях высоких температур, тяжелых садок деталей в многоместных приспособлениях. Поэтому он должен обладать:

- достаточной жаропрочностью;
- сопротивлением циклическим нагрузкам;
- высокой химической устойчивостью, в том числе при высоких температурах, т.е. жаростойкостью.

В настоящее время оснастку централизованно изготавливают из жаропрочных сталей на основе железа (ГОСТ 977-88): 20Х25Н19С2Л, 40Х24Н12С2Л, 35Х23Н7С2Л, 35Х18Н24С2Л. Однако жаропрочность и жаростойкость этих сталей ниже, чем у никелевых сплавов (например, сплав ХН70ТЮР) [1]. В то же время по жаростойкости никелевые сплавы уступают сплавам на основе хрома [2].

Цель настоящей работы — оценка возможности и целесообразности применения жаростойкого жаропрочного сплава на основе хрома для изготовления технологической оснастки для высокотемпературных (св. 1000°C) операций термической обработки с целью повышения стойкости (долговечности) оснастки. Это актуально, т.к. термическая оснастка может быть металлоемким и трудоемким изделием.

Методика исследования

Исследовали сплав Х65НВФТ и сталь 35Х18Н24С2Л (табл. 1, 2).

Испытание на растяжение проводили на установке «RMC100» (Schenck Trebel). Образцы — по ГОСТ 1497-84, тип IV; диаметр рабочей части $D_0 = 3$ мм,

расчетная длина $l = 5 D_0$. Количество образцов на точку — пять. Относительная погрешность не превышала 10% с достоверностью 95%.

Микроструктуру изучали на инвертированном металлографическом микроскопе GX-51 Olympus. Пробоподготовку образцов выполняли на оборудовании фирмы «Struers».

Таблица 1. Химический состав сплава Х65НВФТ, % масс

Cr	Ni	W	V	Ti	Примеси, не более			
					O	N	Fe	$\Sigma(Al+Si)$
основа	31–35	1–3	0,1–0,4	0,05–0,3	0,08	0,04	0,5	0,2

Таблица 2. Химический состав сплава 35Х18Н24С2Л, % масс

Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Примеси, не более	
					S	P
основа	23–25	17–20	2–3	До1,5	0,03	0,035

Термическую обработку образцов и оснастки проводили в камерной электрической печи с воздушной атмосферой ПМК 3.6.2/14 (максимальная температура 1400°C). Отжиг образцов и оснастки из сплава Х65НВФТ выполняли по следующему режиму: выдержка при 1300°C 2 час, охлаждение до 900°C со скоростью 50°C/час, выдержка 6 час, охлаждение до 550°C со скоростью 50°C/час, выдержка 3 час, охлаждение на воздухе.

Оснастку из стали 35Х18Н24С2Л подвергали закалке от 1150°C с охлаждением воде, в соответствии с ГОСТ 977-88.

Промышленные испытания оснастки проводили при закалке инструментов из быстрорежущей стали Р6М5. Закалочный нагрев осуществляли в соляной ванне среда — $BaCl_2$, раскислитель — FeSi (2–3% от массы соли). Охлаждение в масле.

Экспериментальная и аналитическая часть

Свойства сплава Х65НВФТ изучались нами ранее [3–7]. Было показано, что жаростойкость сплава зависит от структуры (в работе [6] изучали жаростойкость сплава в состоянии поставки, после закалки, закалки и отпуска, отжига). Структура сплава двухфазная. Это α -фаза (твердый раствор Ni в Cr) и γ -фаза (твердый раствор Cr в Ni) (рис. 1а). Режим отжига обеспечивает полное выделение γ -фазы из пересыщенного при нагреве однофазного сплава (см. рис. 1а), т.к. при 900–950°C наблюдается более крутой подъем линии сольвус, примыкающей к однофазной области α -фазы, чем линии сольвус, примыкающий к области γ -фазы (отношение b/c , характеризующее количество γ -фазы, практически максимально; см. рис. 1).

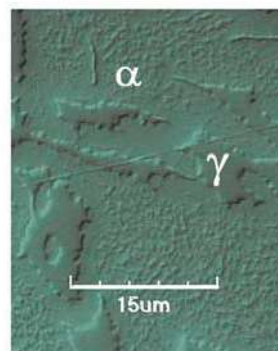
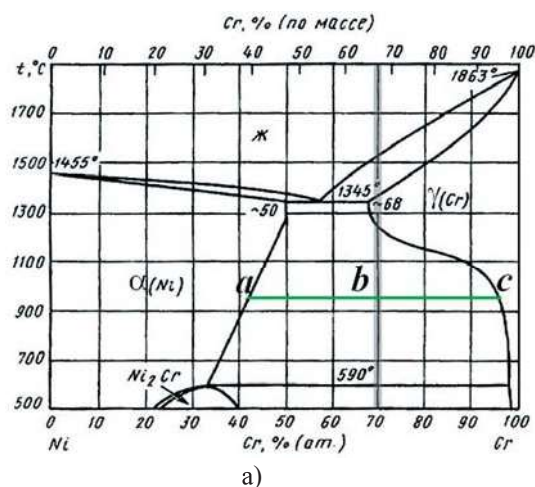


Рис. 1. Диаграмма состояния Ni-Cr (а), структура сплава Х65НВФТ после отжига (б)

Сплав после такой обработки имеет крупнозернистую структуру (рис. 1б). Лучшей жаростойкостью обладают сплавы с меньшей поверхностью межзеренных границ, т.е. крупнозернистых [6]. Это является одним из обоснований выбора режима термической обработки сплава Х65НВФТ. Кроме того, температура отжига, равная 1300°C, выше температуры закалки быстрорежущих сталей, это устраняет или, по меньшей мере, значительно снижает вероятность фазовых превращений в технологической оснастке при нагреве под закалку инструментов из быстрорежущих сталей.

Сталь 35Х18Н2С2Л, согласно ГОСТ 977-88 закаляют от 1150°C, ниже температуры закалки быстрорежущих сталей (1210–1230°C стали Р6М5 и 1270–1290°C стали Р18), это определяет возможность фазовых превращений при нагреве, которые часто сопровождаются объемными изменениями, снижающими сопротивление циклическим нагрузкам.

Механические свойства сплава Х65НВФТ после отжига с 1300°C (не приведены в ранее опубли-

кованных работах) выше, чем стали 35Х18Н2С2Л. При практически удовлетворительных показателях пластичности (δ и ψ — относительного удлинения и сужения) пределы прочности и пластичности (σ_B и σ_T) сплава Х65НВФТ в 1,5–2 раза выше, чем стали 35Х18Н2С2Л (табл. 3).

Важным преимуществом хрома перед металлами железной группы (Fe, Ni) является повышенное сопротивление термоциклическим нагрузкам. Величина термических напряжений ($\sigma_{\text{терм}}$), возникающих под действием многократных повторных циклов изменения температуры, определяется перепадом температур (ΔT) и свойствами материала (табл. 4):

$$\sigma_{\text{терм}} = \frac{\pm \alpha \times E \times \Delta T}{1 - \mu}, \quad (1)$$

где: α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона.

Таблица 3. Механические свойства сплава Х65НВФТ (экспериментальные после отжига при 1300°C) и стали 35Х18Н2С2Л (по ГОСТ 977-88)

Сплав/сталь	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
Х65НВФТ	825	620	12	18
35Х18Н2С2Л	549	294	20	25

Таблица 4. Свойства металлов, определяющие сопротивление термической усталости

Металл	E , ГПа	$\alpha \times 10^6$, К ⁻¹	μ	$\alpha \times E / (1 - \mu) \times 10^{-6}$ [ГПа К ⁻¹]
Cr	288	4,4	0,21	1604
Ni	196	13,6	0,33	3978
Fe	210	11,3	0,23	3081

Благодаря малому значению коэффициента линейного расширения (α) величина возникающих термических напряжений в сплавах хрома при одинаковом значении ΔT в 2–2,5 раза меньше, чем в сплавах на основе железа и никеля. Высокое содержание хрома в сплаве Х65НВФТ способствует снижению уровня термических напряжений, возникающих в условиях переменного воздействия температур.

Меньшие термические напряжения, возникающие при переменных температурных воздействиях (термоциклировании), наряду с более высокой прочностью определяют преимущество сплавов на основе хрома перед сплавами на основе железа и никеля. Сплавы на основе хрома и позиционируются как лучший материал для работы в условиях термоциклирования вследствие высокого сопротивления термической усталости [8].

Длительные промышленные испытания (10 мес.) оснастки (плита размерами 600×450×20 с отверстиями для установки инструмента) подтвердили это положение. Вы-

полнили закалку инструментов из быстрорежущей стали с нагревом в хлор-бариевой ванне. Стойкость оснастки из стали 35Х18Н2С2Л до полного отказа вследствие коробления плиты и заметной коррозии — 970 садок.

Плита из сплава Х65НВФТ выдержала закалку 1515 садок инструмента, после чего оставалась годной к использованию. Достигнутое повышение стойкости около 60%. Можно прогнозировать повышение стойкости как минимум в два раза по сравнению со сталью 35Х18Н2С2Л.

Заключение

Использование сплава на основе хрома для изготовления термической оснастки для высокотемпературной термической обработки обеспечивает ее высокую стойкость. Это является результатом высокого сопротивления термоциклическим нагрузкам (термической усталости), жаропрочности и жаростойкости сплава.

Библиографический список

1. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник. — М. Металлургия. 1988. — 191 с.

2. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов 2-е изд. М.: Металлургия, 1965. — 428 с.

3. Адаскин А.М. Влияние структуры и температуры испытаний на виды изломов жаропрочного сплава / В.Н. Бутрим, В.С. Кубаткин, И.Ю. Сапронов. Вестник МГТУ «СТАНКИН». № 4 (39). 2016 с. 14–21.

4. Adaskin A.M. Strain Hardening Curves and Mechanical Properties of a Chromium-Base Refractory Alloy as a Function of Heat Treatment and Test Temperature / V.N. Butrim, V.S. Kubatkin, I.Yu. Sapronov. Metal Science and Heat Treatment / January 2016, Volume 57.

5. Адаскин А.М. Влияние структуры и температуры испытаний на виды изломов жаропрочного сплава // В.Н. Бутрим, В.С. Кубаткин, И.Ю. Сапронов. Вестник МГТУ «СТАНКИН». № 4 (39). 2016 с. 57–62.

6. Адаскин А.М. Влияние режима термической обработки на жаростойкость сплава на основе хрома при высокотемпературном окислении на воздухе / Бутрим В.Н., Кубаткин В.С., Сапронов И.Ю. «Вопросы материаловедения». № 4 (88), 2016. pp. 625–631

7. Кубаткин В.С., Бутрим В.Н., Адаскин А.М., Сапронов И.Ю. Влияние структуры и температуры испытаний на виды изломов жаропрочного сплава // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2016. № 4. — С. 25–29

8. Симс, Ч. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель // пер. с англ. Под ред. Е.М. Савицкого. — М. Металлургия. 1976. — 566 с.

Адаскин Анатолий Матвеевич — канд. техн. наук, доц. кафедры композиционных материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

tolla.home@list.ru

Кубаткин Владимир Сергеевич — руководитель проектов ООО «Центр эффективных производственных решений»

vavilon0008@gmail.com

Adaskin Anatoly Matveevich — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Composite materials” of MSUT “STANKIN”

tolla.home@list.ru

Kubatkin Vladimir Sergeevich — project manager CEPR Ltd.

vavilon0008@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ: НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПЛУНЖЕРНОГО ЛИФТА

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS ENGINEERING: A NEW DESIGN OF A PLUNGER LIFT

Нефтегазовое машиностроение — отрасль, от которой зависит эффективное выполнение технологических процессов добычи нефти и газа, поэтому инновационная активность в данной сфере имеет огромное значение. В связи с быстроменяющимися требованиями в производстве и конкуренции на рынке, повышение научного и инновационного потенциала данной отрасли — одно из перспективных направлений развития нефтегазового машиностроения. В работе представлен анализ инновационного потенциала в промышленности в рамках рассмотрения технологических инноваций обрабатывающих производств; предложена новая конструкция плунжерного лифта; произведены исследования в программной среде Ansys по критерию газогидродинамики изучаемого объекта исследования.

Oil and gas engineering is an industry on which the effective execution of technological processes of oil and gas production depends, therefore, innovative activity in this area is of great importance. Due to the rapidly changing requirements in production and competition in the market, increasing the scientific and innovative potential of this industry is one of the promising directions for the development of oil and gas engineering. The paper presents an analysis of the innovation potential in industry in the framework of the consideration of technological innovations of manufacturing industries; a new design of a plunger lift is proposed; studies have been carried out in the Ansys software environment according to the criterion of gas-hydrodynamics of the studied object of research.

Ключевые слова: плунжерный лифт, дебит газа, САЕ-система Ansys, обводнение скважины.

Keywords: plunger lift, gas flow rate, Ansys CAE-system, well watering.

Введение

Технологические инновации в обрабатывающем производстве и их применение при добыче полезных ископаемых являются перспективным направлением развития нефтегазового машиностроения в условиях факторов, влияющих на промышленность. В свою очередь, мировой рост спроса на энергию диктует необходимость разработки и эксплуатации месторождений с падающими показателями добычи. В связи с выше представленным, система плунжерного лифта является одним из актуальных технических устройств, направленных на решение проблем удаления жидкости в стволе скважины для повышения дебита [1–16]. Цель исследования — разработка модернизированной конструкции системы плунжерного лифта и проведение инженерных расчетов по наиболее оптимальным конструктивным параметрам рассматриваемой конструкции.

Работы исследователей [1–16] ориентированы на решение задач, связанных с разработкой новых способов и методов получения износостойких материалов, деталей и изделий, модернизацией материально-

технического обеспечения для добывающей отрасли, автоматизации технологических и производственных процессов.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Для выявления цели, актуальности и проблемы исследования применялись методы сбора данных, их анализа и обобщения. Для получения конкретных конструкторско-технологических свойств исследуемого объекта применялись методы инженерных расчетов, численных исследований с использованием программных средств CAD/CAE/CAM-систем.

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии со статистическими данными инновационная активность предприятий машиностроения на сегодняшний момент времени носит нестабильный характер с 2017 по 2020 годы: наибольшая

активность наблюдалась в 2017 году, а далее — резкий спад в 2019 году. Удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе обследованных организаций, по Российской Федерации, по видам экономической деятельности в рамках обрабатывающего производства: металлургического; производства готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования; производства машин и оборудования, наглядным образом представлен на рисунке 1. На данном графике представлены данные с 2017 по 2020 годы и прогноз на 2023 год, в связи с которым наблюдается тенденция развития технологических инноваций в металлообрабатывающем производстве, а также рост затрат на исследования и разработки.

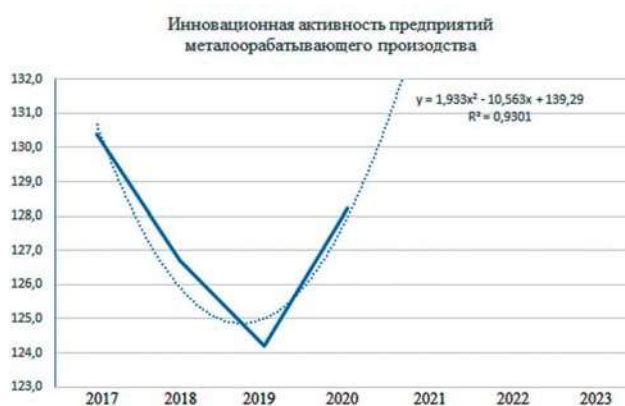


Рис. 1. График инновационной активности по технологическим инновациям предприятий промышленного производства: металлургическое, производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования, производство машин и оборудования

Анализ статистических данных по технологическим инновациям в металлообрабатывающем производстве и их применению в добывающей промышленности позволяет сделать вывод о том, что развитие нефтегазового машиностроения является актуальной задачей, требующей детального рассмотрения и реализации в производстве за счет разработки новых устройств и средств.

По результатам обзора литературных источников [1–16] возникает необходимость улучшения конструкции устройства с точки зрения аэродинамики. Во время работы плунжерного лифта между поверхностями трубчатого корпуса и лифтовой колонны присутствует небольшой зазор, вследствие чего характер движения устройства во многом сказывается на износостойкости. Факторы эксплуатации плунжерного лифта позволяют сделать вывод о необходимости обеспечения плавного спуска и подъема плунжера с целью сниже-

ния механического воздействия на корпус изделия путем внедрения в конструкцию конфузурно-диффузорной системы.

Движение потока воздуха в конфузуре характеризуется тем, что динамическое давление в нем в направлении движения потока увеличивается, а статическое — уменьшается. Увеличивается скорость течения жидкости или газа. Диффузор — обратная конфузуре конструкция, в которой происходит замедление потока.

При определенном соотношении угла раскрытия диффузора, угла сужения конфузур и длине сужения прямого участка конструкции конфузурно-диффузорная система позволяет контролировать скорость проходящего через плунжер потока газа и жидкости и, соответственно, скорость самого устройства. В результате этого при подъеме и спуске трубчатый корпус подвергается меньшей механической деформации, повышается ресурс работы.

Для сравнения оптимизированного варианта плунжера были созданы две конструкции, отличающиеся углами сужения/расширения и длиной сужения. Расчет производился в среде Ansys Fluent. Исходные данные аналогичны в обоих вариантах: давление на точке входа в конструкцию составляет 1,8 МПа, а начальная скорость достигает 5 м/с; рассматривается внутренняя полость конструкции плунжера с конфузурно-диффузорной системой, через которую проходят потоки воды и природного газа.

На рисунке 2 представлено распределение давления (вертикальная плоскость YZ) и скорости (горизонтальная плоскость ZX) на различных участках внутри конструкции при прохождении через нее газа. При этом угол сужения/расширения равен 15 градусам.

По результатам расчетов давление на всех участках конструкции примерно постоянно (изменение происходит лишь в десятитысячных долях значения) и равно 1,8 МПа.

Экстремумы скорости: $v(\max) = 14,91$ м/с и $v(\min) = 1,491$ м/с. На входе поток метана достигает своего среднего значения скорости (5 м/с). Характер прохождения природного газа внутри конструкции аналогичен прохождению потоков воды, единственное значимое отличие заключается в том, что у потоков газа градиент скорости более плавный, площадь участков с минимальной скоростью меньше, а вместе с ними меньше зоны завихрений.

На рисунке 3 представлен сравнительный график зависимости значений скорости от координаты для потоков воды (линия синего цвета) и природного газа (линия красного цвета). Разница значений скорости увеличивается по мере перемещения и достигает своего максимума в конце движения. Это указывает на умеренно резкую смену скорости конструкции в результате перемещения из газовой среды в водную.

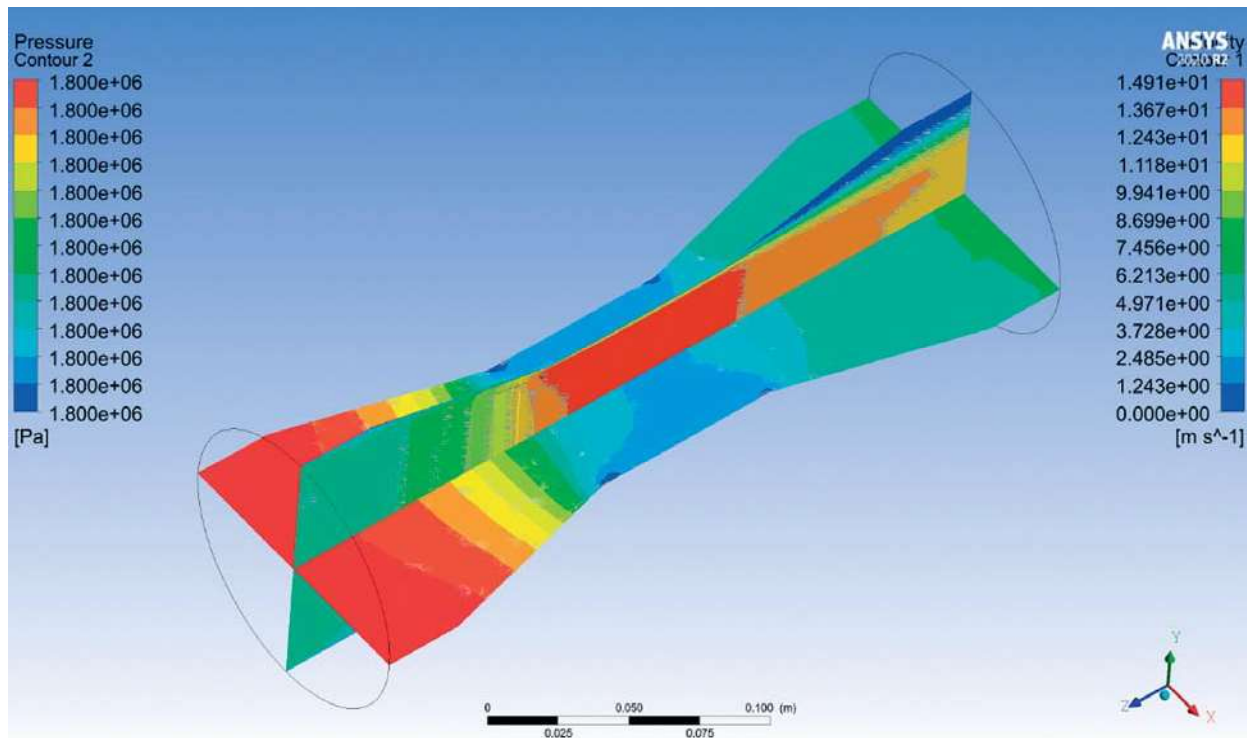


Рис. 2. Результаты расчета новой конструкции в среде Ansys Fluent, при прохождении через нее природного газа (угол сужения/расширения 15 градусов)

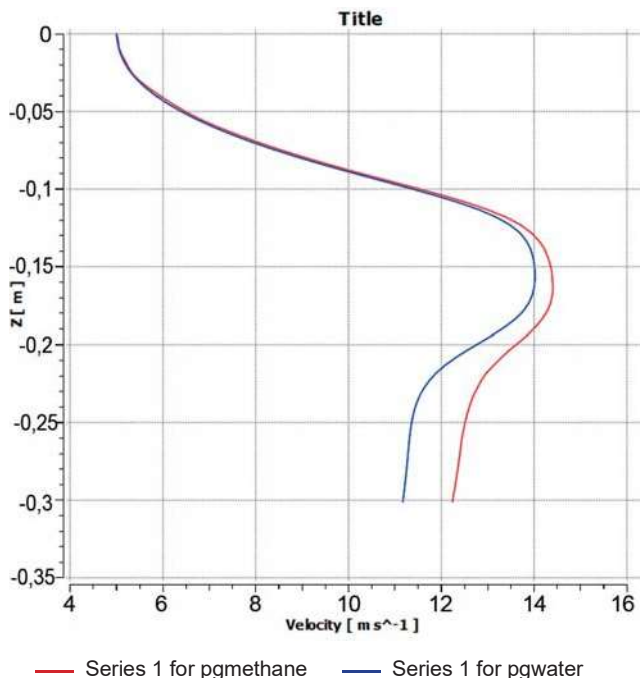


Рис. 3. График зависимости значений скорости от координаты для потоков воды и природного газа (угол сужения/расширения 15 градусов)

На рисунке 4 представлено распределение давления (вертикальная плоскость YZ) и скорости (горизонтальная плоскость ZX) на различных участках внутри конструкции при прохождении через нее газа. При этом угол сужения/расширения равен 30 градусам.

По результатам расчетов давление на всех участках конструкции примерно постоянно (изменение происходит лишь в десятитысячных долях значения) и равно 1,8 МПа.

Экстремумы скорости: $v(\max) = 15,08$ м/с и $v(\min) = 1,508$ м/с. Описание распределения скорости потоков: на входе поток метана достигает своего среднего значения скорости (5 м/с). Характер прохождения природного газа внутри конструкции аналогичен прохождению потоков воды. В центральном направлении скорость остается прежней, максимальной относительно скорости на участке сужения, позволяя двигаться конструкции по наиболее прямой траектории.

На рисунке 5 представлен сравнительный график зависимости значений скорости от координаты для потоков воды (линия синего цвета) и природного газа (линия красного цвета). Разница значений скорости мала и примерно постоянна на интервале $[-0,15; -0,3]$, это дает основание сделать вывод о достаточно плавной смене скорости конструкции в результате перемещения из газовой среды в водную.

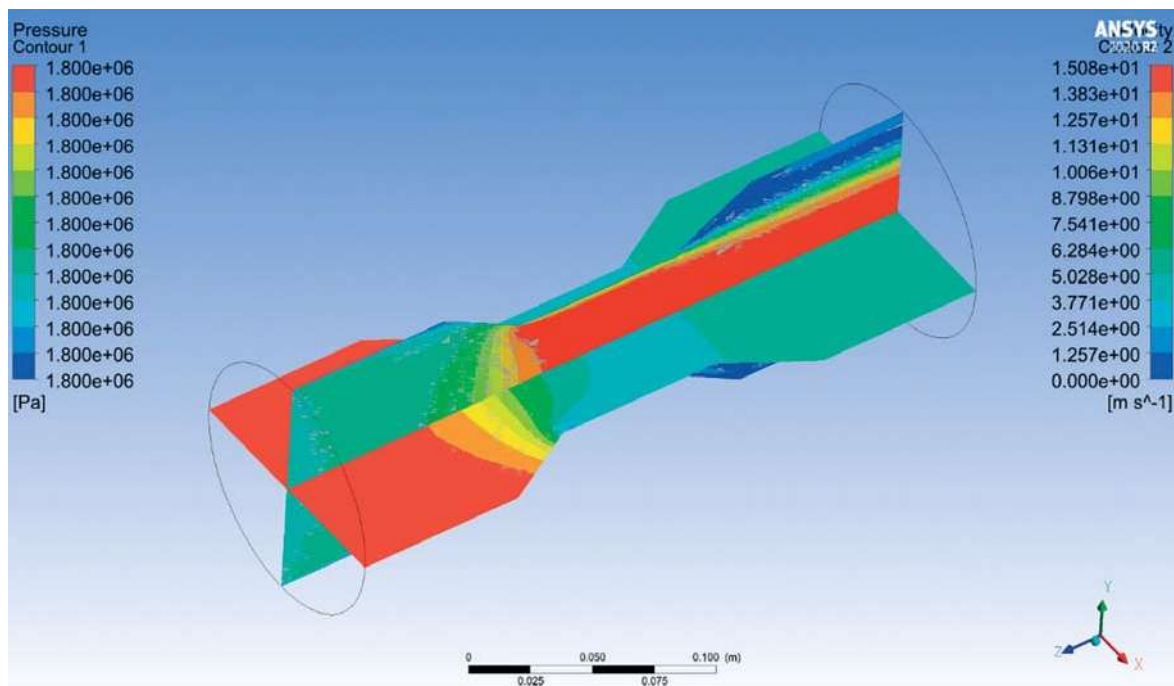


Рис. 4. Результаты расчета новой конструкции в среде Ansys Fluent, при прохождении через нее газа (угол сужения/расширения 30 градусов)

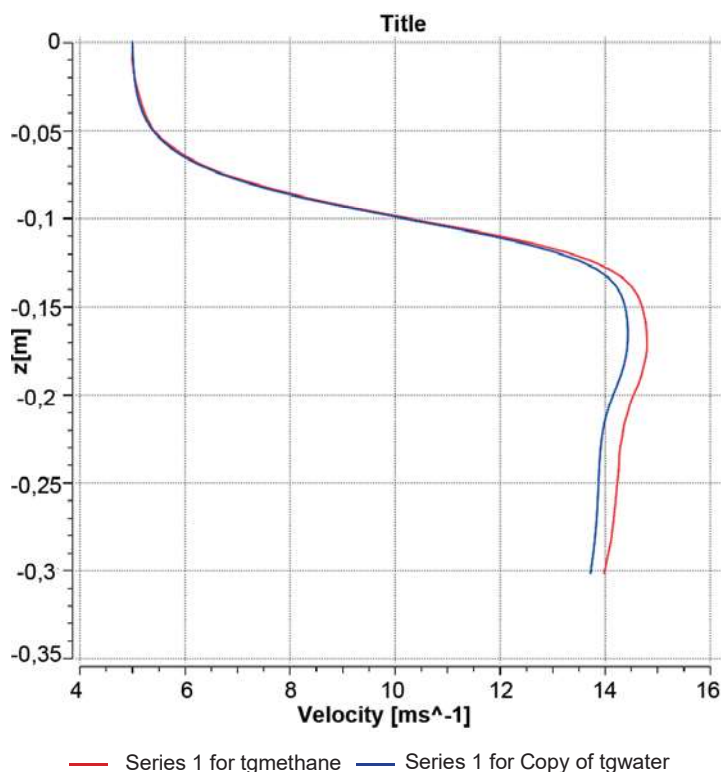


Рис. 5. График зависимости значений скорости от координаты для потоков воды и природного газа (угол сужения/расширения 30 градусов)

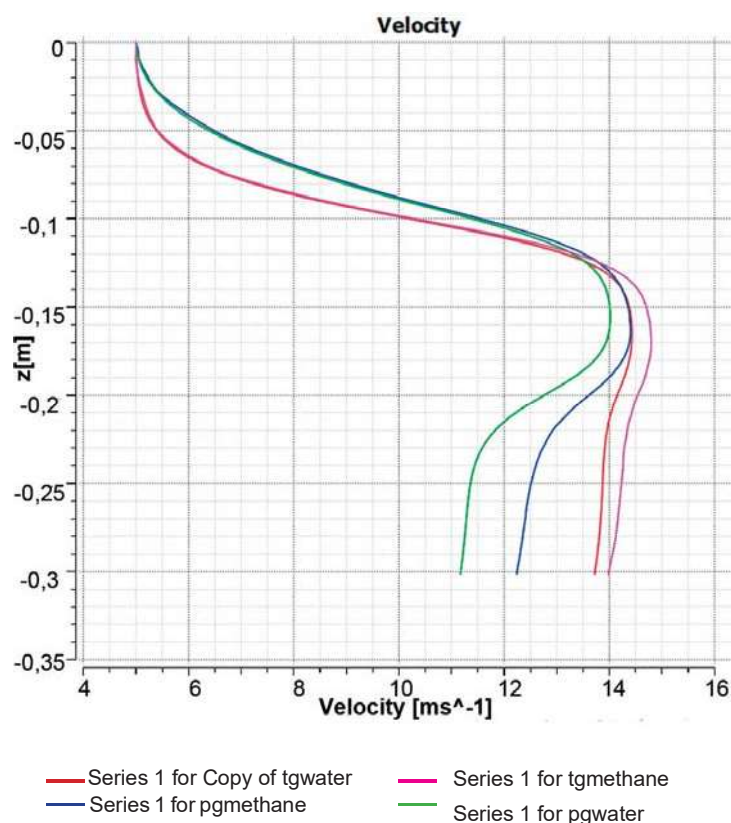


Рис. 6. Общий график зависимости значений скорости от координаты для потоков воды и природного газа при различных углах сужения/расширения

На рисунке 6 представлен сравнительный график скоростей для воды и природного газа в конструкции с углом сужения/расширения 15 градусов (зеленая и синяя линии соответственно) и в конструкции с углом сужения/расширения 30 градусов (красная и розовая линии соответственно). Конструкция с большим градусом расширения/сужения способна развивать наибольшую скорость и одновременно с этим подвержена меньшей дисбалансировке при смене газовой среды на водную из-за незначительности расхождений значений скорости.

На основании проведенных инженерных расчетов двух модернизированных конструкций плунжерного лифта с различными углами сужения/расширения выявлено, что наиболее эффективной является конструкция при угле сужения/расширения 30 градусов. Данная конструкция позволяет развить необходимую для нормальной эксплуатации скорость и при этом сохранить наиболее стабильный ход внутри лифтовой колонны благодаря равномерному потоку скорости и давления внутри конструкции, минимизации колебания скорости при переходе из газовой среды в водную.

Выводы

1. Одним из направлений развития нефтегазового машиностроения является разработка инновационных устройств и способов в данной отрасли. По результатам анализа в исследовании выявлено, что удельный вес организаций, осуществляющих технологические инновации, в общем числе обследованных организаций, по Российской Федерации, по видам экономической деятельности в рамках обрабатывающего производства: металлургического; производства готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования; производства машин и оборудования имеет тенденцию к увеличению по каждому году на 5–6 %.

2. По результатам анализа данных эксплуатации плунжерного лифта, литературного и патентного поиска, а также инженерного анализа известных устройств выявлена необходимость улучшения конструкции устройства по показателям аэродинамики.

3. Разработаны и смоделированы две конструкции плунжерного лифта, отличающиеся от имеющихся тем, что конструкция предусматривает

меньше зон завихрения, преобразует поток проходящих веществ в более прямолинейную траекторию движения. Это дает основание для уменьшения износа «летающего клапана», увеличения срока службы оборудования, стабилизации восстановления дебита газа.

4. Проведены модельные экспериментальные исследования двух модернизированных конструкций плунжерного лифта с различными углами сужения/расширения, выявлено, что наиболее результативной является конструкция с углом сужения/расширения 30 градусов.

Библиографический список

1. Моторин Д.В., Кротов П.С., Гурьянов В.В. Проблемы добычи газа на завершающем этапе разработки месторождений // Территория Нефтегаз. 2011. № 10. С. 50–53.

2. Tong Z., Pei X., Shen Z., Hao Z., Niu H. A plunger lift and monitoring system for gas wells based on deployment-retrievement integration // *Natural Gas Industry*. 2015. №2. P. 449-454.

3. Шулятиков И.В., Мельников И.В. Технология и оборудование для повышения производительности газовых скважин на заключительном этапе разработки газовых месторождений // Территория Нефтегаз. 2009. № 5. С. 68–70.

4. Рагимов Т.Т. Технологии эксплуатации самозадавливающихся скважин Уренгойского месторождения // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 5–6. С. 47–51.

5. Саранча А.В., Левитина Е.Е., Есиков С.Н. Применение различных технологий эксплуатации самопроизвольно останавливающихся газовых скважин на месторождениях крайнего севера // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 3. С. 7–18.

6. Колмаков А.В., Кротов П.С., Кононов А.В. Технологии разработки сеноманских залежей низконапорного газа — СПб.: Недра, 2012. — 175 с.

7. Корякин А.Ю. Комплексные решения задач разработки и эксплуатации скважин Уренгойского добывающего комплекса. — М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. — 272 с.

8. Ефремов А.А. Комплекс мероприятий по продлению рентабельного периода эксплуатации газовых залежей // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 2. С. 28–34.

9. Минликаев В.З., Коваленко А.В., Билалов Н.А., Елистратов А.В. Итоги реализации комплексной Программы реконструкции и технического перевооружения объектов добычи газа на 2011–2015 гг. // Газовая промышленность. 2017. № 1. С. 30–34.

10. Минликаев В.З., Дикамов Д.В., Глухенький А.Г., Мельников И.В., Шулятиков И.В. Эксплуатация самозадавливающихся скважин в условиях завершающего этапа разработки месторождения // Газовая промышленность. 2010. № 2. С. 76–77.

11. Паникаровский В.В., Паникаровский Е.В. Эксплуатация газовых скважин на поздней стадии разработки месторождений // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 5. С. 85–89.

12. Паникаровский Е.В., Паникаровский В.В., Ваганов Ю.В. Повышение эффективности применения пенообразователей для удаления жидкости с забоев газовых скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 3. С. 54–62.

13. Изюмченко Д.В., Елистратов А.В., Лаухин Ю.А. Влияние реконструкции объектов добычи газа на показатели разработки месторождений // Вести газовой науки. 2016. № 2 (26). С. 34–38.

14. Бузинов С.Н. Технология эксплуатации скважин на поздней стадии разработки месторождений. — М.: Газпром экспо, 2013. — 67 с.

15. Пономарев А.И., Рагимов Т.Т., Шигидин О.А. Опыт эксплуатации газовой скважины с концентрическими лифтовыми колоннами // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 4. С. 19–31.

16. Николаев О.В., Гереш Г.М., Харитонов А.Н., Шулупин С.А. Оптимизация диаметра лифтовых труб на поздней стадии разработки газовых месторождений // Вести газовой науки. 2019. № 4 (20). С. 81–88.

References

1. Motorin D.V., Krotov P.S., Guryanov V.V. Problems of gas production at the final stage of field development. *The territory of Neftegaz*, 2011, vol. 10, pp. 50–53.

2. Tong Z., Pei X., Shen Z., Hao Z., Niu H. A plunger lift and monitoring system for gas wells based on deployment-retrievement integration, *Natural Gas Industry*, 2015, vol. 2, pp. 449–454.

3. Shulyatnikov I.V., Melnikov I.V. Technology and equipment for increasing the productivity of gas wells at the final stage of gas field development. *The territory of Neftegaz*, 2009, vol. 5, pp. 68–70.

4. Ragimov T.T. Technologies of operation of self-drilling wells of the Urengoy field. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2019, vol. 5–6, pp. 47–51.

5. Sarancha A.V., Levitina E.E., Yesikov S.N. Application of various technologies for the operation of spontaneously stopping gas wells in the fields of the Far North. *The science. Innovation. Technologies*, 2019, vol. 3, pp. 7–18.

6. Kolmakov A.V., Krotov P.S., Kononov A.V. Technologies for the development of Cenomanian deposits of low-pressure gas. *Nedra*, 2012, p. 175.
7. Koryakin A.Yu. Complex solutions to the problems of development and operation of wells of the Urengoy mining complex. *Gubkin Russian State University of Oil and Gas*, 2016, p. 272.
8. Efremov A.A. A set of measures to extend the cost-effective period of operation of gas deposits. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2014, vol. 2, pp. 28–34.
9. Minlikaev V.Z., Kovalenko A.V., Bilalov N.A., Elistratov A.V. The results of the implementation of the comprehensive program of reconstruction and technical re-equipment of gas production facilities for 2011-2015. *Gas Industry*, 2017, vol. 1, pp. 30–34.
10. Minlikaev V.Z., Dikamov D.V., Gluhenky A.G., Melnikov I.V., Shulyatkov I.V. Operation of self-drilling wells in the conditions of the final stage of field development. *Gas industry*, 2010, vol. 2, pp. 76–77.
11. Panikarovskiy V.V., Panikarovskiy E.V. Exploitation of gas wells at a late stage of field development. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2017, vol. 5, pp. 85–89.
12. Panikarovskiy E.V., Panikarovskiy V.V., Vaganov Yu.V. Improving the efficiency of the use of foaming agents to remove liquid from the faces of gas wells. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2019, vol. 3, pp. 54–62.
13. Izyumchenko D.V., Elistratov A.V., Laukhin Yu.A. The influence of reconstruction of gas production facilities on the indicators of field development. *News of gas science*, 2016, vol. 2 (26), pp. 34–38.
14. Buzinov S.N. Technology of well exploitation at the late stage of field development, *Gazprom Expo*, 2013, p. 67.
15. Ponomarev A.I., Ragimov T.T., Shigidin O.A. Experience of operation of a gas well with concentric elevator columns. *The science. Innovation. Technologies*, 2019, vol. 4, pp. 19–31.
16. Nikolaev O.V., Geresh G.M., Kharitonov A.N., Shulepin S. A. Optimization of the diameter of elevator pipes at the late stage of development of gas fields. *News of gas science*, 2019, vol. 4 (20), pp. 81–88.

Темпель Юлия Александровна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

tempelja@tyuiu.ru

Кокорин Илья Николаевич — ассистент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

kokorinin@tyuiu.ru

Ергулович Инга Николаевна — обучающаяся ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

ergulovich@gmail.com

Tempel Yulia Aleksandrovna — candidate Sc. of Engineering, senior Lecturer at the department of “Mechanical Engineering Technologies” of Tyumen Industrial University

tempelja@tyuiu.ru

Kokorin Ilya Nikolaevich — assistant at the department of “Mechanical Engineering Technology” of Tyumen industrial university

kokorinin@tyuiu.ru

Ergulovich Inga Nikolaevna — student of Tyumen industrial university

ergulovich@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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