

На правах рукописи



Тарачков Михаил Владимирович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
УПЛОТНЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»), г. Калининград

Научный руководитель: Калабин Александр Леонидович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Программное обеспечение»
федерального государственного образовательного
учреждения высшего образования «Тверской
государственный технический университет» (ФГБОУ
ВО «ТвГТУ»)

Официальные
оппоненты: Дивин Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Мехатроника и технологические
измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный технический университет», г. Тамбов

Лопатин Александр Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Автоматизация производственных
процессов» Новомосковского института (филиала)
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический
университет имени Д. И. Менделеева»,
г. Новомосковск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический
университет», г. Самара

Защита состоится 25 июня 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г.
Тверь, Наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного
технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан “_____” _____ 202__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Дзюба С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Конвейерное производство совершило революцию в промышленности. Использование конвейера обеспечивает высокую производительность, регулирует темп производства, задает ритмичность. Конвейер изменил процесс сборки сложных изделий, разбив его на небольшие повторяющиеся операции, которые можно выполнить быстро и эффективно. Конвейеры применяются почти во всех отраслях промышленности. Для автоматизации рутинных операций на конвейерных линиях широко используются промышленные роботы.

В научной литературе исследована задача «взять и положить» (pick-and-place), когда робот захватывает объект и перемещает его в установленную зону. Для обнаружения объекта используются технологии искусственного интеллекта, применяемые, в частности, в совокупности с традиционными датчиками, например датчиком прерывания луча. Положения шарниров робота определяются с использованием задач прямой и обратной кинематики. Как правило, робот перемещается по траектории, содержащей минимальное количество точек. Используются стратегии обработки объектов FIFO, SPT и их модификации, применение которых зависит от решаемой задачи.

Для рассматриваемой предметной области похожей является задача автоматической сварки с применением промышленных роботов, которая исследована во многих публикациях. С точки зрения перемещения робота данная задача аналогична задаче pick-and-place за исключением того, что не объект перемещается, а робот следует вдоль будущего сварного шва, описывая при этом траекторию в форме зигзага. Для управления положением валов электродвигателей используются контроллеры (ПИД, линейно-квадратичный), нечеткая логика или искусственные нейронные сети. Все они имеют свои преимущества, недостатки и условия применения.

Широко исследована задача уплотнения мелких (менее 1 см) частиц в форме эллипсоида и параллелепипеда под воздействием вибрации, при этом размеры частиц существенно меньше размера емкости, в которой они располагаются, а вибрационная установка размещена под емкостью или сбоку. Предстоит исследовать, что будет происходить при осуществлении вибрационного воздействия с частицами, размеры которых всего лишь в несколько раз меньше размеров емкости, причем эти емкости перемещаются по скоростной конвейерной линии, над которой размещена вибрационная установка.

Проведенный в ходе выполнения работы анализ показал необходимость модернизации существующих математических моделей уплотнения объектов под действием вибрации, а также алгоритмов и программных средств, позволяющих автоматизировать данный процесс.

В решении задачи автоматизации скоростной конвейерной линии, на участке которой необходимо выполнять уплотнение полуфабрикатов, заинтересовано предприятие АПХ «Мираторг». Участок уплотнения полуфабрикатов является важным этапом при решении задачи упаковки

полуфабрикатов в коробки, так как около 25% коробок содержат полуфабрикаты, которые выступают за пределы коробки, что является браком. Участок уплотнения позволяет снизить процент таких коробок до 2-3. В настоящий момент уплотняют полуфабрикаты люди. Автоматизация данного процесса способна повысить эффективность всей линии.

Кроме того, решение рассматриваемой задачи может быть интересно предприятиям, упаковывающим полуфабрикаты в тару при производстве пельменей, котлет и т.п.

Постановка задачи исследования – разработка нового метода уплотнения полуфабрикатов на конвейерной линии по упаковке полуфабрикатов; разработка математических моделей и интеллектуальных алгоритмов управления технологическим процессом уплотнения полуфабрикатов; проектирование, изготовление, программирование, испытания прототипа системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов с применением робота-манипулятора.

Цель исследования заключается в повышении производительности линии по упаковке полуфабрикатов при сохранении существующего уровня брака или его уменьшении.

Для реализации заявленной цели решены следующие задачи:

1. Исследовать работу участка скоростной линии пищевого производства, на которой происходит упаковка полуфабрикатов в коробки, где ключевым этапом является уплотнение полуфабрикатов. Определить основные параметры линии. Сформировать и описать предлагаемый метод уплотнения полуфабрикатов.
2. Разработать математическую модель вибрационно-силового уплотнения полуфабрикатов. Ввести оценку выступания полуфабрикатов за верхнюю границу коробки. Определить зависимость качества уплотнения от прикладываемого усилия, времени, в течение которого усилие прикладывается, амплитуды и частоты колебаний.
3. Предложить методику автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов, заключающуюся в объединении набора методов, которые позволят повысить эффективность производственной линии.
4. Разработать систему технического зрения для оценки выступания полуфабрикатов за пределы коробки. Оценить качество ее работы.
5. Разработать алгоритм управления процессом уплотнения полуфабрикатов. Внедрить в функциональную схему автоматизированной системы контроллер силы надавливания и критерий качества его работы. Провести имитационное моделирование системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов.
6. Реализовать прототип системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов с применением робота-манипулятора согласно предложенной методике, провести испытания для подтверждения её работоспособности и эффективности, адекватности разработанных математических моделей и алгоритма управления.

Объектом исследования является технологический процесс уплотнения полуфабрикатов на скоростной конвейерной линии.

Предметом исследования являются методы уплотнения объектов под действием вибрации, математические модели вибрационно-силового уплотнения частиц, интеллектуальные алгоритмы управления технологическим процессом уплотнения полуфабрикатов, методики автоматизации производств, на которых используются конвейеры.

Методы исследования. В ходе решения поставленных задач использовались математический аппарат линейной алгебры, геометрии, теория автоматического управления, робототехника и мехатроника, теория вычислительных систем и программирования, методы построения имитационных моделей, методы искусственного интеллекта, метод прототипирования.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика автоматизации технологического процесса уплотнения полуфабрикатов на скоростной конвейерной линии по упаковке полуфабрикатов, которая заключается в проектировании робота-манипулятора следующими методами:
 - a. математическое моделирование вибрационно-силового уплотнения полуфабрикатов;
 - b. методы искусственного интеллекта для оценки выступления полуфабрикатов за границы коробки;
 - c. разработка алгоритмов планирования обработки коробок с полуфабрикатами и вибрационно-силовым уплотнением полуфабрикатов.
2. Разработана математическая модель вибрационно-силового уплотнения полуфабрикатов, отличающаяся от существующих расположением источника вибраций (над объектом) и размерами объектов внутри нее (объекты в несколько раз меньше размера емкости). Модель позволила установить зависимость между качеством уплотнения, воздействующей силой и временем, в течение которого оказывается воздействие. Введена оценка выступления полуфабрикатов за пределы коробки. Определена зависимость качества уплотнения от прикладываемого усилия, времени, в течение которого усилие прикладывается, амплитуды и частоты колебаний. Определены значения основных параметров: амплитуда, частота, коэффициент трения между рабочим органом и полуфабрикатами.
3. Предложен метод уплотнения полуфабрикатов на скоростной конвейерной линии, заключающийся в оказании вибрационно-силового воздействия на полуфабрикаты. Разработан алгоритм управления процессом уплотнения полуфабрикатов.
4. Создана система автоматизации на основе алгоритма обработки коробок с полуфабрикатами с элементами технического зрения для определения положения коробки, оценки выступления полуфабрикатов за ее пределы и регулирования силы надавливания, введен критерий качества его работы.

Проведено имитационное моделирование системы автоматизации в среде Matlab Simulink.

Практическая ценность научных результатов диссертации состоит в том, что с использованием методов, предложенных в диссертационной работе, разработан, изготовлен, собран и запрограммирован прототип системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов с применением робота-манипулятора. Проведенные испытания прототипа подтверждают, что его использование на производстве позволило повысить количество обрабатываемых коробок с полуфабрикатами примерно на 30%. Уровень брака не изменился.

Достоверность и обоснованность проведенных исследований и полученных результатов.

Для проверки достоверности и обоснованности проведенных исследований и полученных результатов был спроектирован, изготовлен, собран и запрограммирован прототип системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов с применением робота-манипулятора. Был проведен эксперимент, в ходе которого робот-манипулятор был установлен над конвейерной линией и выполнял работу по уплотнению полуфабрикатов. В результате прототип системы автоматизации показал повышение скорости работы примерно на 30% по сравнению с выполнением той же работы людьми. Уровень брака при этом не изменился.

Апробация работы. Основные результаты по разработке системы автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов на линии пищевой промышленности с применением промышленного робота были представлены на конференциях:

1. V Всероссийская Поспеловская конференция с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» ГИСИС-2020, 18.05–22.05.2020 г., г. Зеленоградск.
2. XXXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-34», 24.11–26.11.2021 г., г. Саратов.
3. XXXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-35», 30.05–03.06.2022 г., г. Ярославль.
4. VI Всероссийская Поспеловская конференция с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» ГИСИС-2022, 27.06–01.07.2022 г., г. Зеленоградск.
5. XXXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-35», 24.10–28.10.2022 г., г. Минск.

Теоретическая значимость заключается в предложенной методике автоматизации технологического процесса уплотнения полуфабрикатов на скоростной конвейерной линии по упаковке полуфабрикатов, в создании математической модели уплотнения полуфабрикатов, разработке алгоритма для уплотнения коробок с полуфабрикатами, имитационном моделировании системы автоматизации и расчете необходимых характеристик аппаратного обеспечения.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению на производственной линии АПХ «Мираторг» (г. Калининград).

В ходе натуральных испытаний при непрерывной работе в течение 72 часов (согласно порядку ввода в эксплуатацию электроустановок) прототип системы автоматизации показал, что способен выполнять задачу по уплотнению полуфабрикатов. Обработка коробок с полуфабрикатами может осуществляться круглосуточно со скоростью до 105 коробок в минуту (прирост скорости обработки коробок примерно на 30%). До внедрения прототипа работу выполняли несколько человек со скоростью 60–80 коробок в минуту.

Публикация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ: 2 статьи в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК; 2 свидетельства о регистрации РИД, излагающие основные научные результаты; 1 статья в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus. Дополнительно опубликовано 6 статей в других научных журналах из списка РИНЦ.

Положения, составляющие научную новизну, получены лично автором.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа содержит 162 страницы основного текста, 15 таблиц, 80 рисунков. Список использованной литературы включает 108 наименований.

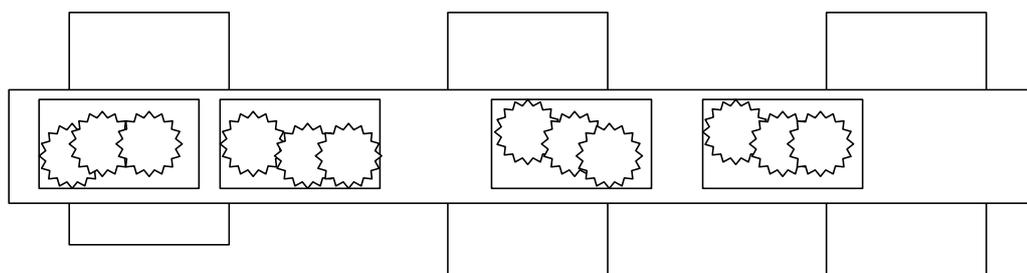
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и определены решаемые в диссертации научные задачи. Изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы. Обоснованы выбранные методы исследования.

В первой главе описана проблематика скоростного участка линии упаковки пищевого производства в группе компаний «Мираторг», приведены качественные и количественные характеристики линии.

Линия состоит из трех участков. На участке А (рисунок 1) при помощи робота-манипулятора с пневматической присоской пакет с полуфабрикатами помещается в коробку произвольным образом. Чтобы аппарат для заклеивания коробок на участке В отработал корректно, на участке Б люди уплотняют пакет с полуфабрикатами таким образом, чтобы он не выступал за верхнюю границу коробки.

Участок Б имеет размер примерно 3×3 метра. Через него проходит от 60 до 80 коробок в минуту. Скорость конвейерной линии $v_k \approx 0.56$ м/с является не постоянной, но изменяется незначительно. На производстве присутствует магистральная подача сжатого воздуха. Участок располагается в холодном цеху, температура около 5°C , относительная влажность воздуха 80%.



Участок А.
Робот-манипулятор с вакуумной присоской помещает полуфабрикаты в коробку

Участок Б.
Рабочие уплотняют полуфабрикаты

Участок В.
Автоматическая машина заклеивает коробку

Рисунок 1. Схема участка уплотнения полуфабрикатов

В таблице 1 приведены характеристики коробки с полуфабрикатами.

Из проведенного обзора литературных источников по теме уплотнения частиц под действием вибрации следует, что под действием вибрации возникают гармонические колебания. Рассмотрено влияние амплитуды, частоты колебаний, формы и размеров частиц на качество уплотнения. Однако в данных исследованиях частицы обладают существенно меньшими размерами по сравнению с размерами емкости, где они находятся, что не соответствует соотношению размеров частиц и емкости в решаемой нами задаче. Также ввиду специфики производственной линии на предприятии «Мираторг» вибрационная установка может быть подведена к частицам только сверху.

Рассмотрены литературные источники, в которых описывается процесс обработки объектов на конвейерной линии. Выделены подходы, связанные с системами управления на основе контроллеров и на основе интеллектуальных методов. Подчеркиваются преимущества контроллеров, реализующих закон ПИД-регулирования, при использовании в задачах с небольшим (до 5) количеством регулируемых параметров, в то же время имеет место тренд на использование искусственных нейронных сетей для работы с большим количеством регулируемых параметров. Однако встает задача их корректного обучения. Изучен методы решения задач прямой и обратной кинематики для связи координат и углов поворотов валов электродвигателей подводящего механизма (робота):

$$X = f_f(\theta),$$

$$\theta = f_i(X),$$

Таблица 1
Характеристика коробки с наггетсами

Параметр	Значение
Длина, м	0.18
Ширина, м	0.13
Высота, м	0.04
Масса, кг	0.025
Количество наггетсов, шт.	12
Вес, кг	0.3

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3), X = (x, y, z),$$

где $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – углы поворота, x, y, z – координаты рабочего органа. Выделен подход, заключающийся в минимизации контрольных точек траектории движения подводящего механизма, снижающий время перемещения за счет уменьшения этапов разгона и торможения.

Для точного определения положения коробок предлагается использовать комбинацию датчика прерывания луча, а для определения границ содержимого коробки – алгоритмы искусственного интеллекта (нейросетевой подход), что является лучшим на данный момент способом распознавания. Особое внимание уделено алгоритму планирования обработки коробок. Для задачи, в которой объекты перемещаются по конвейерной линии один за другим, применяется алгоритм FIFO – «первым пришел, первым ушел». С учетом модификации алгоритм может быть успешно применен для решения рассмотренной задачи.

Таким образом, установлено, что в научной литературе описано большинство подходов, которые могут быть использованы для решения задачи уплотнения полуфабрикатов. Но в связи со спецификой задачи математические модели и алгоритмы управления требуют модификации, что и служит обоснованием актуальности исследования и формирует его задачи.

Во второй главе вводится оценка выступления полуфабрикатов за пределы коробки, оценивается ее максимальное значение и распределение. Рассматривается N коробок, проходящих по конвейеру за время T . Каждая коробка маркируется индексом $i = 1, \dots, N$. На рисунке 2 представлено схематичное изображение i -ой коробки с полуфабрикатами сбоку и сверху. Показаны корпус коробки и пакет с полуфабрикатами. Длина коробки $A_b = 0.18$ м, ширина $B_b = 0.1$ м (не отмечена на рисунке), высота $Z_b = 0.04$ м. Размеры одинаковы для всех коробок. Вводится система координат O_bXYZ таким образом, что точка O_b находится в центре нижней плоскости коробки. Плоскость коробки разбивается на квадраты S_{jk} , где $j = 1, \dots, N_a$, $k = 1, \dots, N_b$. Z_{jk} – максимальная по оси Z точка полуфабрикатов в квадрате S_{jk} , причем

$$S_{jk} = \begin{cases} 1, & Z_{jk} > Z_b \\ 0, & Z_{jk} \leq Z_b \end{cases}$$

Уровнем выступления полуфабрикатов за пределы коробки e называется суммарная площадь квадратов, в которых максимальная по оси Z точка превосходит высоту коробки Z_b :

$$e = \frac{A_b B_b}{N_a N_b} \sum_{j=1}^{N_a} \sum_{k=1}^{N_b} S_{jk}. \quad (1)$$

Для построения закона распределения дискретной случайной величины e были произведены измерения 50 различных коробок с полуфабрикатами. Длина одного полуфабриката $a_n = 0.04$ м, ширина $b_n = 0.02$ м. Поскольку максимальным уровнем выступления полуфабрикатов e_{max} будет при

расположении четырех полуфабрикатов в три слоя, то $e_{max} = 3a_H b_H = 0.0024 \text{ м}^2$. Следовательно, $e \in [0, 0.0024]$.

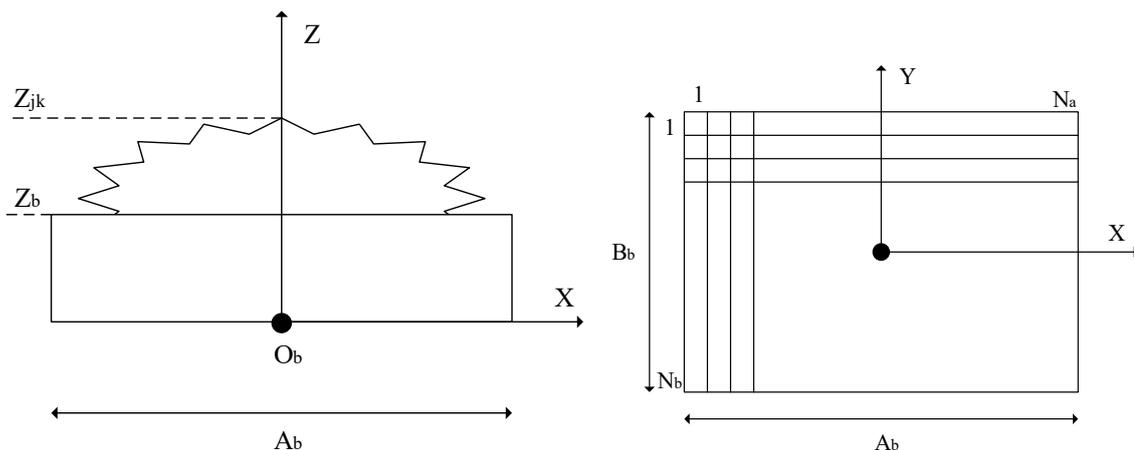


Рисунок 2. Схематичное изображение i -ой коробки, вид сбоку и сверху

Для построения закона распределения дискретной случайной величины e были произведены измерения 50 различных коробок с полуфабрикатами. Длина одного полуфабриката $a_H = 0.04 \text{ м}$, ширина $b_H = 0.02 \text{ м}$. Поскольку максимальным уровень выступания полуфабрикатов e_{max} будет при расположении четырех полуфабрикатов в три слоя, то $e_{max} = 3a_H b_H = 0.0024 \text{ м}^2$. Следовательно, $e \in [0, 0.0024]$.

Приводится построение математической модели вибрационно-силового уплотнения, основанной на публикациях. Определяется условие начала движения полуфабриката, находящегося в коробке и лежащего на других полуфабрикатах. Его ускорение $a = \frac{d^2x}{dt^2}$ можно получить из уравнения

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m}(k_1 - k_2) - k_2g,$$

где F_H – сила, действующая на полуфабрикат со стороны вибрационной установки, k_1 и k_2 – коэффициенты трения между вибрационной установкой и полуфабрикатами и между двумя полуфабрикатами соответственно. С другой стороны, вибрационная установка совершает гармонические колебания, максимальное ускорение при котором составляет

$$\frac{d^2x_p}{dt^2}_{max} = A\omega^2 = 4\pi^2 A\nu^2,$$

где A – амплитуда колебаний, ν – частота. Полагая, что ускорение $\frac{d^2x}{dt^2}$ и максимальное значение ускорения $\frac{d^2x_p}{dt^2}_{max}$ примерно равны при условии, что вибрационная установка и полуфабрикат прижаты к друг другу, а сила F распределяется между несколькими полуфабрикатами, суммарный уровень выступания которых равен e , выведена формула зависимости этого уровня от параметров уплотнения. С учетом того, что в процессе уплотнения можно

эффективно управлять только силой надавливания F и временем t_p , в течение которого надавливание осуществляется, имеет место зависимость:

$$e = e(F, t_p). \quad (2)$$

График зависимости (2) приведен на рисунке 3.

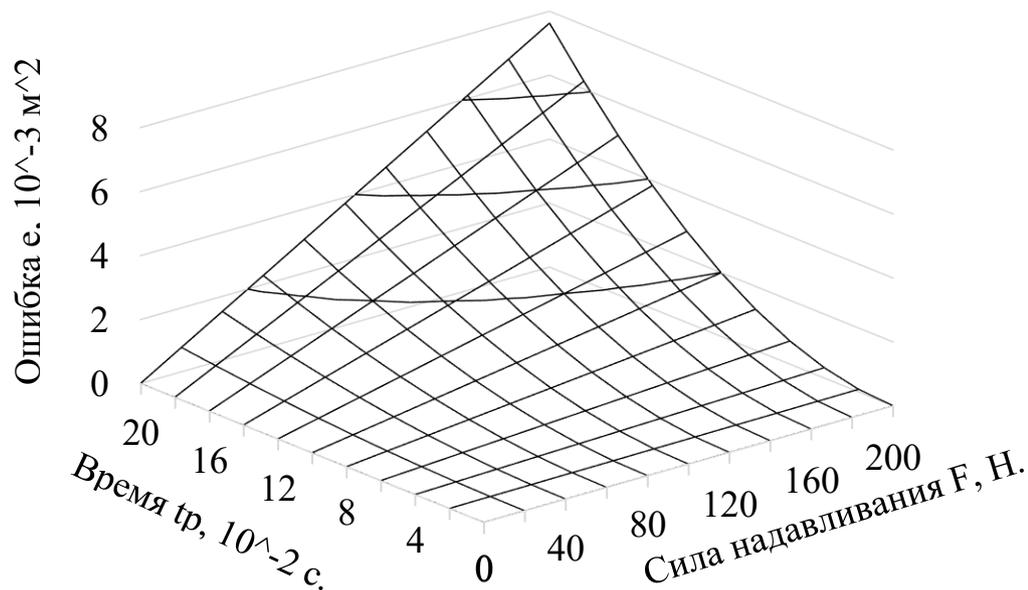


Рисунок 3. График зависимости качества уплотнения полуфабрикатов от силы надавливания и времени приложения этой силы

Исходя из полученных численных значений для устранения выступающего полуфабриката e можно оперировать двумя параметрами: временем t_p и силой надавливания F . Кроме того, были определены такие важные неуправляемые параметры, как коэффициент трения между вибрационной установкой и полуфабрикатами, амплитуда и частота колебаний.

Приведено построение математической модели обработки последовательности коробок с полуфабрикатами. На рисунке 4 изображено вибрационное устройство, расположенное над конвейерной лентой, способное перемещаться в трехмерном пространстве, создавать вибрацию и оказывать надавливание на полуфабрикаты. Система координат устройства – O_rXYZ . Заштрихованным прямоугольником изображен рабочий орган устройства, который совершает циклические перемещения последовательно через точки $M_1(0, W, Z)$, $M_2(-X, 0, -H - h)$, $M_3(X, 0, Z - H - h)$, так как это наиболее быстрый способ перемещения. Отклонение по координате Y у точки M_1 необходимо, чтобы рабочий орган не цеплял крышку открытой коробки с полуфабрикатами. Высота опускания рабочего органа H необходима, чтобы не цеплять край коробки и выступающие полуфабрикаты в точке M_2 . Параметр h изменяется в зависимости от того, какое усилие необходимо приложить к полуфабрикатам. Высота Z точки M_1 рассчитывается исходя из расстояния до конвейера и параметров H и h .

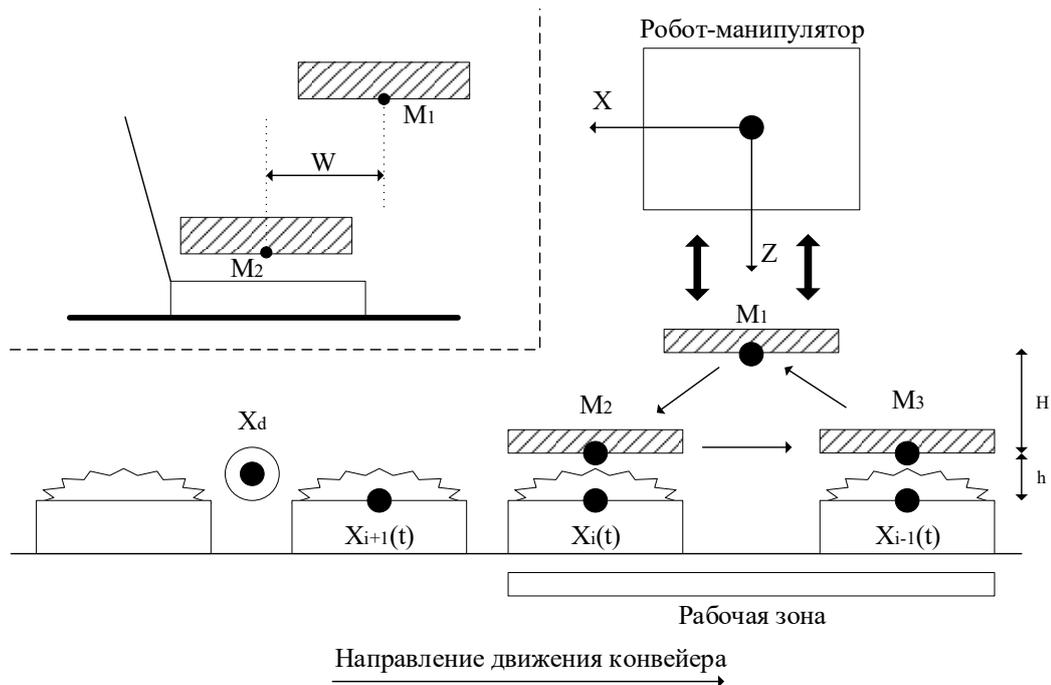


Рисунок 4. Схема осуществления уплотнения полуфабрикатов (вид сбоку и спереди)

Расчет координаты X зависит от необходимого времени t_{p_i} на обработку i -ой коробки и скорости конвейерной ленты $v_k(t)$:

$$X_i = v_k \frac{t_{p_i}}{2}.$$

На обработку i -ой коробки вибрационной установкой затрачивается время

$$t_i = t_{f_i} + t_{b_i} + t_{p_i},$$

где t_{f_i} – время перемещения вибрационной установки из точки ожидания к месту начала уплотнения, t_{b_i} – время перемещения от места окончания уплотнения в точку ожидания, t_{p_i} – время, затрачиваемое на уплотнение текущей коробки.

При обработке i -й коробки определим время, через которое на ее место переместится коробка с индексом $i + 1$:

$$t_{max_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{v_k(t)},$$

где $x_{i+1}(t), x_i(t)$ – координаты соседних коробок. Тогда справедливо, что на обработку i -ой коробки можно потратить время не большее, чем t_{max_i} :

$$\begin{aligned} t_{max_i} &\geq t_i, \\ t_{max_i} &\geq t_{f_i} + t_{b_i} + t_{p_i}. \end{aligned}$$

Далее в главе 2 приведены расчеты $t_{p_i} \leq t_{p_{max}} = t_{max_i} - t_{f_i} - t_{b_i}$.

Приведена математическая постановка задачи (3). При выполнении процесса уплотнения полуфабрикатов эффективно управлять можно временем уплотнения t_p ($t_p \leq t_{p_{max}}$) и силой надавливания F ($F \leq 200$ Н). Поэтому устраняемый уровень выступания полуфабрикатов можно выразить следующим образом:

$$e = e(t_p, F).$$

Для i -й коробки задача уплотнения считается решенной, если

$$e_i - e(t_{pi}, F_i) = 0.$$

Рассмотрим N коробок, перемещающихся по конвейерной линии за время T . Зависимость N от параметров линии можно выразить по формуле

$$N = N(v_k, D, T) = \frac{T v_k}{A_b D},$$

где v_k – скорость конвейера, $A_b = 0.18$ м – длина коробки, D ($D \geq 1$) – множитель, характеризующий расстояние между коробками.

Тогда задачу уплотнения последовательности коробок можно записать:

$$\sum_{i=1}^N E(e_i, t_{pi}, F_i) \rightarrow 0,$$

$$E(e_i, t_{pi}, F_i) = \begin{cases} e_i - e(t_{pi}, F_i), & e_i > e(t_{pi}, F_i) \\ 0, & e_i \leq e(t_{pi}, F_i) \end{cases}, \quad (3)$$

где e_i – уровень выступания полуфабрикатов за пределы i -й коробки, t_{pi} – время уплотнения i -й коробки, F_i – сила надавливания для уплотнения i -й коробки.

В соответствии с поставленной задачей производится расчет параметров вибрационной установки (см. рисунок 5).

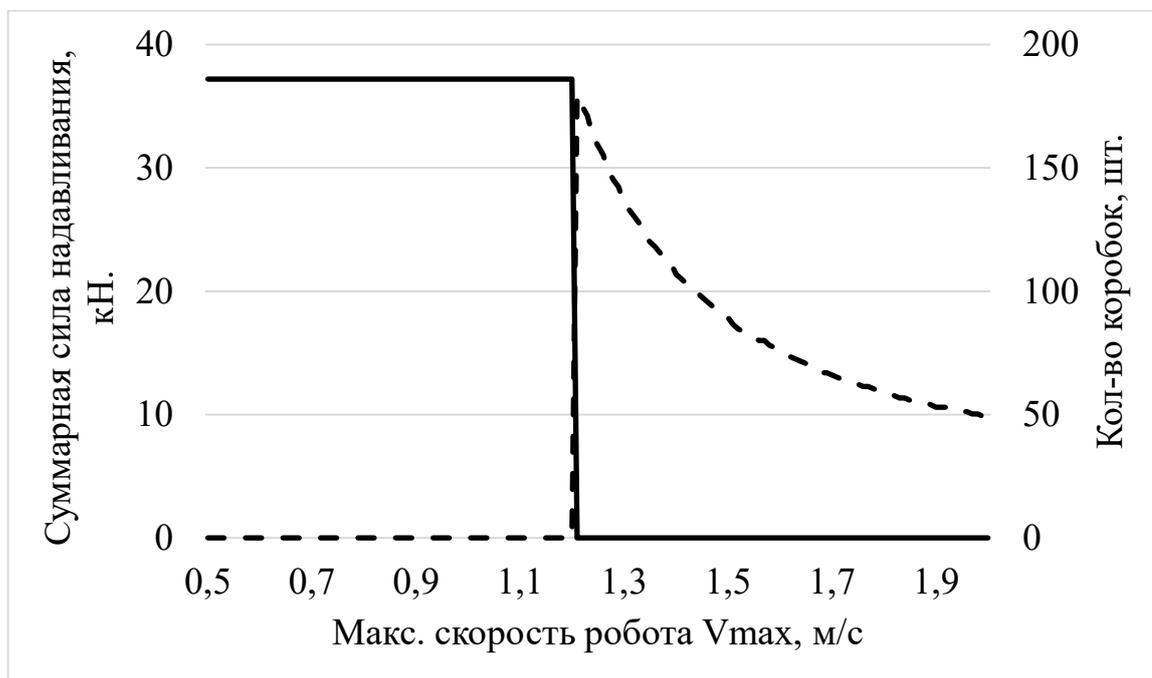


Рисунок 5. Результаты моделирования процесса уплотнения полуфабрикатов при $e_i = 0.0024\text{м}^2$, $i = 1, \dots, N$; $D = 1$; $v_k = 0.56$ м/с. По оси абсцисс отложена максимальная скорость перемещения вибрационной установки. По оси ординат слева – сила надавливания, справа – количество коробок. Сплошной график – количество коробок, прошедших через вибрационную установку и отнесенных к браку, пунктирный – суммарная сила надавливания на полуфабрикаты.

На графике рассмотрен худший случай, где через вибрационную установку проходит максимальное количество коробок за время $T = 60$ с, каждая из коробок обладает максимальным уровнем выступления полуфабрикатов $e = 0.0024$ м². Видно, что при увеличении скорости работы вибрационной установки v_{max} уменьшается суммарная сила надавливания.

Далее во второй главе приведен расчет параметров вибрационной установки исходя из худшего случая.

В третьей главе дается описание интеллектуального алгоритма определения уровня выступления полуфабрикатов за пределы коробки. Используя фотографию и облако точек с RGB-D камеры Microsoft Kinect, алгоритм сначала детектирует коробку, а затем измеряет расстояние до полуфабрикатов. Для решения задачи детекции коробок используется сверточная искусственная нейронная сеть YOLOv5.

Приводится описание алгоритма планирования обработки коробок с полуфабрикатами, который базируется на возможности влиять на качество уплотнения изменением силы надавливания и времени, в течение которого оно осуществляется.

Описывается контроллер силы надавливания. Используется контроллер, реализующий закон ПИД-регулирования, настраиваемый методом Зиглера-Никольса.

Вводится критерий качества работы контроллера. Пусть на уплотнение коробки с полуфабрикатами отводится время t_p , уплотнение начинается с времени t и заканчивается в $t + t_p$. Уставка силы надавливания равна F , тогда суммарная сила надавливания (импульс силы) за указанный период времени может быть выражена по формуле

$$S_F = \frac{\int_t^{t+t_{pi}} F(t) dt}{t_{pi}}.$$

Датчик силы измеряет силу надавливания $F_c(t)$, оценить суммарную силу надавливания (импульс силы) можно по формуле

$$S_{F_c} = \frac{\int_t^{t+t_{pi}} F_c(t) dt}{t_{pi}}.$$

Задача уплотнения будет считаться решенной, если в течение заданного времени на полуфабрикаты оказывалось воздействие не менее заданного:

$$S_F \leq S_{F_c}.$$

Приведена функциональная схема системы автоматизации, основанная на существующих схемах управления процессом сварки и захвата объектов на конвейерной линии (данные процессы аналогичны процессу в решаемой задаче в части перемещения рабочего органа робота-манипулятора к объекту на конвейерной линии) с добавлением блока регулирования силы надавливания на базе контроллера.

В среде Matlab Simulink с использованием модуля SimScape Mechanics создана имитационная модель для проверки корректности работы алгоритма управления. На рисунке 6 (слева) приведен график уставки силы надавливания и график фактически приложенной к полуфабрикатам силы. Следует уточнить, что воздействие оказывается с $t_1 = 0.44$ с. по $t_2 = 0.63$ с., поэтому данный график не похож на график затухающего гармонического колебания.

На рисунке 6 (справа) представлен график суммарной силы надавливания, какой она должна быть согласно уставке, и ее фактического значения. Видно, что критерий качества работы контроллера выполняется.

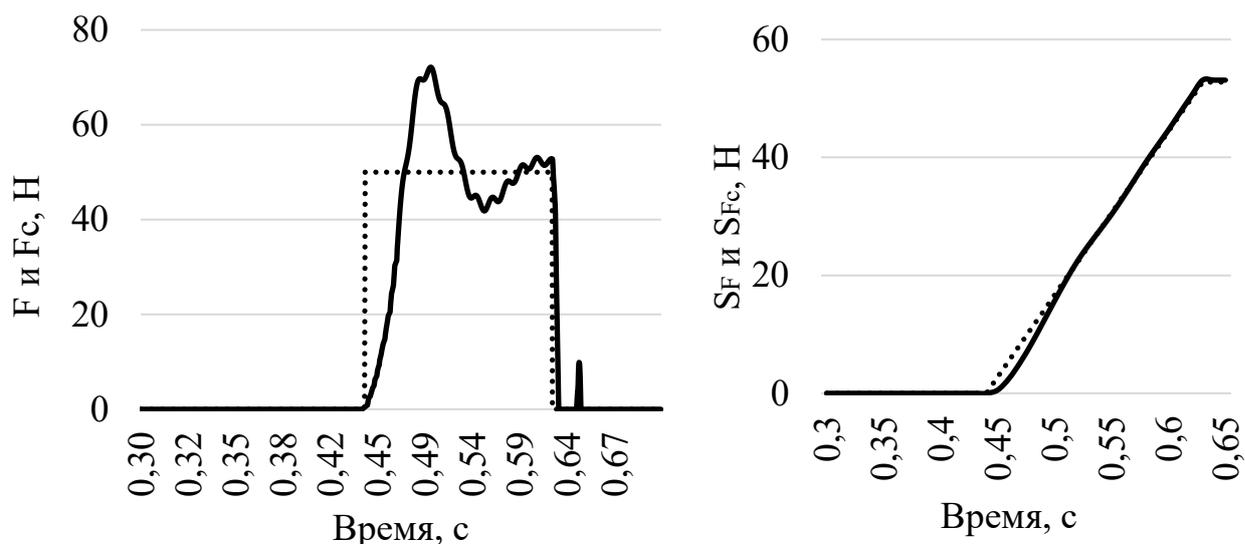


Рисунок 6. Слева - график уставки силы надавливания (точечный) и фактически приложенной силы надавливания (сплошной). Справа - Суммарная сила надавливания: уставка (точечный), эксперимент (сплошной)

В четвертой главе описан процесс проектирования, изготовления, сборки, программирования и испытаний прототипа робота-манипулятора, на основе которого построена автоматизация уплотнения полуфабрикатов.

Рабочий орган (вибрационная установка) рассчитан на совершение колебаний с частотой около 40 Гц и амплитудой 0.02 м.

Робот-манипулятор с дельта-кинематикой имеет максимальную скорость перемещения около 2 м/с, радиус рабочей области 0.42 м.

Определение положения коробок происходит при помощи датчика прерывания луча. Измеряется скорость движения конвейерной ленты.

Управление механической частью возложено на бортовой микроконтроллер STM32F407VG и разработанную плату управления, которая с необходимыми элементами автоматики расположена в шкафу управления.

Компьютер используется для выполнения алгоритма определения выступления полуфабрикатов за пределы коробки, в котором применяется сверточная нейронная сеть YOLOv5. Фотографии и облако точек для работы алгоритма поступают от RGB-D камеры Microsoft Kinect.

Для программирования микроконтроллера использованы язык C++ 14 стандарта, среда разработки Cube IDE и операционная система реального времени FreeRTOS. Программное обеспечение управляющего компьютера написано на языке C++ 11 стандарта с использованием программной платформы Robot Operating System.

Представлены программы и результаты проведенных испытаний точностных, скоростных характеристик, испытаний качества уплотнения полуфабрикатов при скорости перемещения коробок, равной 105 штук в минуту.

Испытания показали работоспособность и эффективность созданной системы автоматизации уплотнения полуфабрикатов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследована работа участка скоростной линии пищевого производства, на которой происходит упаковка полуфабрикатов. Определено, что наиболее важная задача, решаемая при упаковке, – уплотнение полуфабрикатов. Определены основные параметры линии: скорость линии; количество коробок, проходящих через участок упаковки; максимальная сила надавливания на полуфабрикаты; коэффициент трения между полуфабрикатами. Сформирован и описан предлагаемый метод уплотнения полуфабрикатов при помощи робота-манипулятора, рабочий орган которого осуществляет вибрационно-силовое воздействие. Введена оценка выступления полуфабрикатов за пределы коробки. Приведена оценка максимального времени уплотнения коробки с полуфабрикатами $t_{p_{max}}$, математическая постановка задачи, заключающаяся в минимизации уровня выступления полуфабрикатов для последовательности коробок. Установлена зависимость между максимальной скоростью робота-манипулятора, количеством уплотняемых коробок и суммарной прикладываемой силой надавливания. Произведены расчеты, которые показывают, что предложенный метод способен повысить эффективность производственной линии. При максимальной скорости робота-манипулятора $v_{max} = 1.21$ м/с возможно произвести уплотнение 183 коробок с максимальным уровнем выступления $e_i = 0.0024$ м², прикладывая суммарное усилие $F = 36$ кН. При этом скорость конвейерной ленты $v_k = 0.56$ м/с.
2. Предложена и реализована методика автоматизации технологического процесса уплотнения полуфабрикатов на скоростной конвейерной линии по упаковке полуфабрикатов, которая заключается в проектировании робота-манипулятора следующими методами:
 - 2.1. Разработана математическая модель вибрационно-силового уплотнения полуфабрикатов. Определена зависимость качества уплотнения от прикладываемого усилия, времени, в течение которого усилие прикладывается, амплитуды и частоты колебаний, коэффициента трения между рабочим органом и полуфабрикатами. Выделены эффективные для управления параметры времени уплотнения t_{p_i} и силы надавливания F_i . Остальные параметры задаются на этапе проектирования рабочего органа и

не изменяются: амплитуда $A = 0.02$ м, частота $\nu = 40$ Гц, коэффициент трения между рабочим органом и полуфабрикатами $k_1 \geq 0.5$ (чем он больше, тем лучше). Согласно расчетам, полученным с помощью математической модели, был спроектирован, изготовлен, собран и запрограммирован прототип системы автоматизации уплотнения полуфабрикатов с применением робота-манипулятора. Натурные испытания показали, что использование прототипа повышает производительность линии, что доказывает адекватность разработанной математической модели.

2.2. Предложена методика автоматизации процесса уплотнения полуфабрикатов, заключающаяся в объединении набора методов, которые позволят повысить эффективность производственной линии. Были использованы методы решения задач прямой и обратной кинематики, метод планирования траектории перемещения рабочего органа робота по минимальному количеству точек, ПИД-контроллеры, оценка выступления полуфабрикатов за пределы коробки на основе методов искусственного интеллекта, алгоритм планирования обработки коробок с полуфабрикатами, математическое моделирование вибрационно-силового уплотнения полуфабрикатов.

2.3. Разработана система технического зрения на основе искусственных нейронных сетей для оценки уровня выступления полуфабрикатов за пределы коробки. Она состоит из RGB-D камеры (640×480 пикселей, 30 кадров/с), датчика прерывания луча, осветительного прибора. RGB-D камера расположена над конвейером так, чтобы одна ось была сонаправлена направлению движения конвейера. RGB-D камера позволила получить изображение и карту глубины. С помощью нейронной сети YOLOv5 решена задача детекции и определена граница полуфабрикатов в пределах коробки (затрачиваемое время – 20 мс). Для обучения YOLOv5 использовалось около 500 размеченных изображений. Точность определения границы составляет 5 мм. Для расчета площади выступающих полуфабрикатов используется участок карты глубины в пределах найденной границы. Абсолютная погрешность измерения площади составляет около 0.0002 м². Ввиду погрешностей оценка выступления полуфабрикатов за пределы коробки осуществляется в большую сторону. Датчик прерывания луча необходим для точного позиционирования коробки из-за затрат времени на обработку нейронной сетью и ограничения частоты съемки камеры. Освещение используется для уменьшения времени экспозиции кадра без размытия изображения.

2.4. Разработан алгоритм управления технологическим процессом уплотнения полуфабрикатов. В функциональную схему системы автоматизации внедрен контроллер силы надавливания. Введен критерий оценки качества работы контроллера: суммарная сила надавливания на полуфабрикаты за время уплотнения должна быть не менее расчетной. В среде Matlab

Simulink создана имитационная модель системы автоматизации технологическим процессом уплотнения полуфабрикатов для разработанного алгоритма управления, которая подтвердила корректность работы алгоритма и математических моделей.

3. Спроектирован, изготовлен, собран, запрограммирован и испытан прототип системы автоматизации с применением робота-манипулятора. Испытания показали адекватность разработанных математических моделей и алгоритма управления. Эффективность производственной линии выросла на 30% при сохранении текущего уровня брака.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Тарачков М.В. Разработка системы управления педиупуляторами антропоморфного робота AP-601M / М.В. Тарачков, О.В. Толстель, А.Л. Калабин // Программные продукты и системы: междунар. науч.-практ. журн. – 2020. – Т. 33, №2. – С. 243–249.

2. Тарачков М.В. Разработка программного обеспечения для системы автоматического управления по выравниванию полуфабрикатов / М.В. Тарачков, О.В. Толстель, А.Л. Калабин // Программные продукты и системы: междунар. науч.-практ. журн. – 2023. – Т. 36, №2. – С. 327–333.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus

3. Tarachkov M.V. Development of an Algorithm for Preparing Semi-finished Products for Packaging / M.V. Tarachkov, O.V. Tolstel, A.L. Kalabin // Society 5.0: Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2023. – P. 53–62.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019665796. Программа управления микроконтроллером робота-манипулятора ДР-1 / М.В. Тарачков; опубл. 28.11.2019 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020664635. Программа управления вибрационной платформой для робота-манипулятора / М.В. Тарачков; опубл. 16.11.2020 г.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. Тарачков М.В. Разработка робота-манипулятора ДР-1 / М.В. Тарачков, А.В. Каленик // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под ред. А.В. Колесникова. – Калининград. – 2020. – С. 482–489.

7. Тарачков М.В. Разработка системы планирования движений робота-манипулятора ДР-1 / М.В. Тарачков, Ф.А. Лебедев // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 12. – С. 70–75.
8. Тарачков М.В. Разработка алгоритма подготовки полуфабрикатов к упаковке / М.В. Тарачков, О.В. Толстель, А.Л. Калабин // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 3. – С. 95–100.
9. Тарачков М.В. Разработка системы управления промышленным роботом ДР-1 для решения задачи подготовки к упаковке охлажденных полуфабрикатов / М.В. Тарачков, О.В. Толстель, А.Л. Калабин // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы VI Всероссийской Пospelовской конференции с международным участием / под ред. А.В. Колесникова. – Калининград. – 2022. – С. 316–323.
10. Тарачков М.В. Модель вибрационно-силового выравнивания при упаковке / М.В. Тарачков, А.Л. Калабин // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 12-1. – С. 39–42.
11. Тарачков М.В. Модель вибрационно-силового выравнивания при упаковке / М.В. Тарачков, А.Л. Калабин // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Техническое науки. – 2023. – №1 (17). – С. 63–70.