

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.0
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-155



МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ В ФОРМЕ КОЛПАЧКА, БЛИЗКИХ К РАВНОРАЗМЕРНЫМ, ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ

Пантиюхина Е.В.¹, Богодяж А.Е.¹, Васин С.А.¹, Бахно А.Л.²

¹Тульский государственный университет, Тула, Россия

²ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», Тула, Россия

Аннотация. Развитие современных промышленных производств с использованием цифровых технологий требует создания новых подходов к управлению качеством изделий массовых производств на всех этапах их жизненного цикла. Высокие требования к качеству выпускаемых изделий должны способствовать разработке и внедрению в единую систему цифрового управления производственного процесса целого комплекса мер, обеспечивающих не только поддержание требуемого уровня качества изделия, но и его прогнозирование, включая меры по предупреждению причин возникновения брака и его устранению. Одним из важных этапов производственных процессов является автоматическая загрузка в автоматизированное оборудование технологических линий различных заготовок в требуемом положении и с заданной производительностью. Для штучных заготовок широко используют механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства. В работе представлены методология, позволяющая обеспечить качество изделий в форме колпачка, представляющая собой комплекс современных систем и методов контроля новых технологических процессов их производства, структура систем автоматической загрузки различных изделий в форме колпачка в технологическое оборудование в требуемом положении; показаны этапы разработки конструктивных ограничений на органы захвата и ориентирования изделий механических дисковых бункерных загрузочных устройств, изложена методология исследования и проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для изделий в форме колпачка.

Ключевые слова: качество изделий массовых производств, автоматическая загрузка, ориентирование заготовок, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство

© Пантиюхина Е.В., Богодяж А.Е., Васин С.А., Бахно А.Л., 2025

Для цитирования

Методология обеспечения качества изделий в форме колпачка, близких к равноразмерным, при автоматизации процессов загрузки / Пантиюхина Е.В., Богодяж А.Е., Васин С.А., Бахно А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 147-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-155>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY FOR ENSURING THE QUALITY OF CAP-SHAPED PRODUCTS CLOSE TO EQUIDIMENSIONAL DURING THE AUTOMATION OF FEEDING PROCESSES

Pantyukhina E.V.¹, Bogodyazh A.E.¹, Vasin S.A.¹, Bakhno A.L.²

¹ Tula State University, Tula, Russia

² PJSC Imperial Tula Arms Plant, Tula, Russia

Abstract. The development of modern industrial production using digital technologies requires the creation of new approaches to quality management of mass produced items at all stages of their life cycle. High requirements for the quality of manufactured products should contribute to the development and implementation of a whole range of measures in a single digital management system of the production process that ensure not only maintaining the required level of product quality, but also its forecasting, including measures to prevent the causes of defects and their elimination. One of the important stages of production processes is the automatic feeding of various blanks into the automated equipment of technological lines in the required position and the specified capacity. Mechanical disk hopper feeding-orienting devices are widely used for piece blanks. The paper presents the methodology that allows to ensure the quality of cap-shaped products, which is a set of modern systems and methods for monitoring new technological processes of their production, the structure of systems for automatic feeding of various cap-shaped products into technological equipment in the required position. The stages of development of design limitations for gripping and orienting elements of products of mechanical disk hopper feeders are shown; the methodology of research and design of mechanical disk hopper loading devices for cap-shaped products is described.

Keywords: quality of mass produced items, automatic feeding, blanks orientation, hopper feeding-orienting device

For citation

Pantyukhina E.V., Bogodyazh A.E., Vasin S.A., Bakhno A.L. Methodology for Ensuring the Quality of Cap-Shaped Products Close to Equidimensional During the Automation of Feeding Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 147-153. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-153>

Введение

Комплексная автоматизация производственных процессов на предприятиях должна осуществляться на основе использования современных компьютерных технологий, систем искусственного интеллекта, контрольно-измерительных приборов, устройств для сбора и передачи данных. Это приведет к повышению эффективности функционирования технологического оборудования, увеличению его производительности и надежности, оптимизации технологических процессов с учетом оптимальных параметров качества выпускаемой продукции. Внедрение цифровых технологий в производственный процесс с целью повышения его эффективности должно опираться на перспективные методы и средства управления качеством изделий на всех этапах жизненного цикла [1–4].

В условиях динамично расширяющейся номенклатуры выпускаемых изделий необходимостью внедрения новых технологий их производства, освоение и выпуск которых должны осуществляться в кратчайшие сроки, необходимо решить множество задач для эффективной реализации производственного процесса [5]. К наиболее важным из них относятся комплексное исследование производства на основе единой цифровой системы менеджмента качества, а также совершенствование и разработка систем автоматической

загрузки изделий, которые необходимо подавать к технологическому оборудованию, в том числе роторным линиям, в заданном положении и с требуемыми производительностью и надежностью [6].

Решение данных задач может включать в себя разработку новой технологии и выбор технологических параметров производства и параметров качества изделий, построение математических моделей производственных процессов и функционирования технологического оборудования, прогнозирование параметров качества изделий, проведение экспериментальных исследований.

Анализ деятельности некоторых предприятий, массово выпускающих изделия, позволил выявить проблемы, связанные с отсутствием или формальным внедрением статистических методов управления качеством [7–9]. Это приводит к отсутствию стабильного качества процесса изготовления изделий и, как следствие, высокой доле брака в выпускаемых партиях готовой продукции. Данная ситуация является недопустимой в условиях высокой конкуренции и требует коренной перестройки производства с созданием современной системы менеджмента качества. Такая система должна включать современные цифровые технологии и средства цифровизации, позволяющие собирать, структурировать и обрабатывать большие массивы данных.

Цель настоящей работы – разработка методологии обеспечения качества изделий массовых производств в форме колпачка и разработка систем их автоматической загрузки на базе механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств, позволяющих обеспечить стабильную и производительную загрузку автоматизированного оборудования для процессов вытяжки заготовок, сборки, оценки качества изделий и других операций технологического процесса. Решение поставленных задач базируется на использовании общих принципов системы управления качеством и теории вероятности.

Общая концепция обеспечения качества изделий массовых производств в форме колпачка при автоматической загрузке

Основными составляющими комплексной методологии обеспечения качества изделий массовых производств являются цели, задачи, законы и принципы, методы и функции, технология и практика управления.

Такая структура комплексной методологии обеспечения качества может использоваться как при традиционных технологиях производства изделий, так и при внедрении новых. При этом следует стремиться к тому, чтобы технологический процесс изготовления изделия не был материалоемким, энергоемким и обеспечивал заданные свойства изделий. Например, при изготовлении стальных изделий в форме колпачка предлагается использовать технологический процесс с ключевой операцией полугорячего выдавливания из прутка (рис. 1).

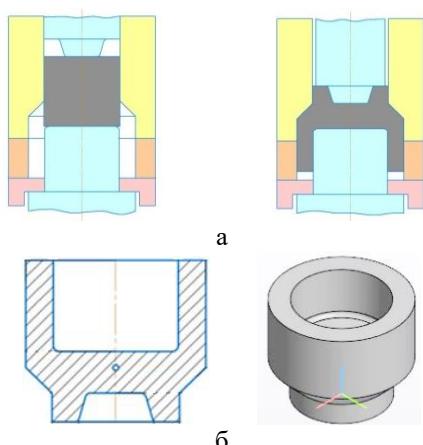


Рис. 1. Этапы двухстороннего полугорячего выдавливания (а) и готовое изделие в форме колпачка (б)

Fig. 1. Double-sided semi-hot extrusion stages (a) and cap-shaped finished product (b)

Изготовление рассматриваемого изделия осуществляется из стального прутка следующим образом [10]. Стальной пруток нарезается на отдельные заготовки 1, которые сначала подвергаются химической и термической обработке, а затем на прессе с помощью

верхнего пуансона 2 и нижнего пуансона 3 осуществляется полугорячее выдавливание с раздачей, результатом которого является готовое изделие в форме колпачка 4. Готовое изделие в дальнейшем должно подаваться в требуемом ориентированном положении на рабочие позиции технологического оборудования (например, для дальнейшей вытяжки, сборки, упаковки) с помощью специальных систем автоматической загрузки (рис. 2).

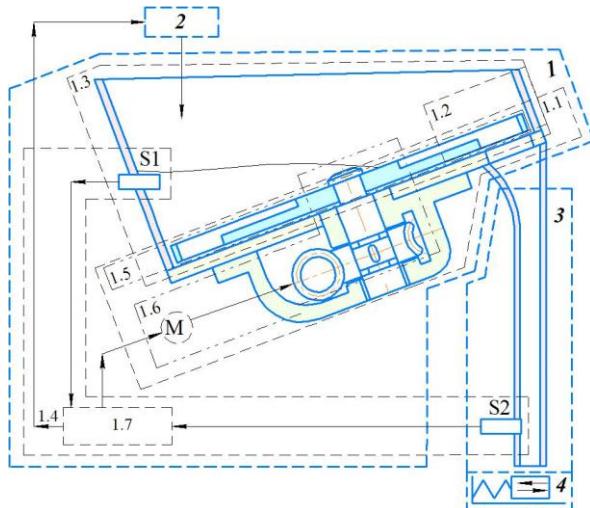


Рис. 2. Структура системы автоматической загрузки штучных изделий

Fig. 2. Structure of the automatic feeding system

Система загрузки состоит из бункерного загрузочно-ориентирующего устройства 1 для ориентирования изделий, включающего захватывающий (1.1), ориентирующий (1.2), бункерный (1.3) и управляющий (1.4) механизмы, органы для захвата (1.5), привод (1.6) и блок управления (1.7), транспортного устройства 2 для подачи изделий в систему, накопительного устройства 3 для обеспечения запаса изделий из-за вероятностного принципа работы бункерного загрузочного устройства, выдающего устройство 4 для синхронной подачи изделий к рабочим органам оборудования, датчиков контроля уровня засыпки заготовок в бункере бункерного механизма, обеспечивающего необходимый запас заготовок (S1) и переполнения (или опорожнения) накопительного устройства изделиями (S2), а также привода (M).

Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство с криволинейным копиром для изделий в форме колпачка и его основные параметры показаны на рис. 3 [11]. Принцип его функционирования основан на смещении центра масс. Изделия удерживаются в органе захвата, если их центр масс располагается ниже крайней верхней точки захватывающего органа. В противном случае они выпадают из органов захвата в процессе пассивного ориентирования, который в различных бункерных загрузочных устройствах реализуется по-разному [12].

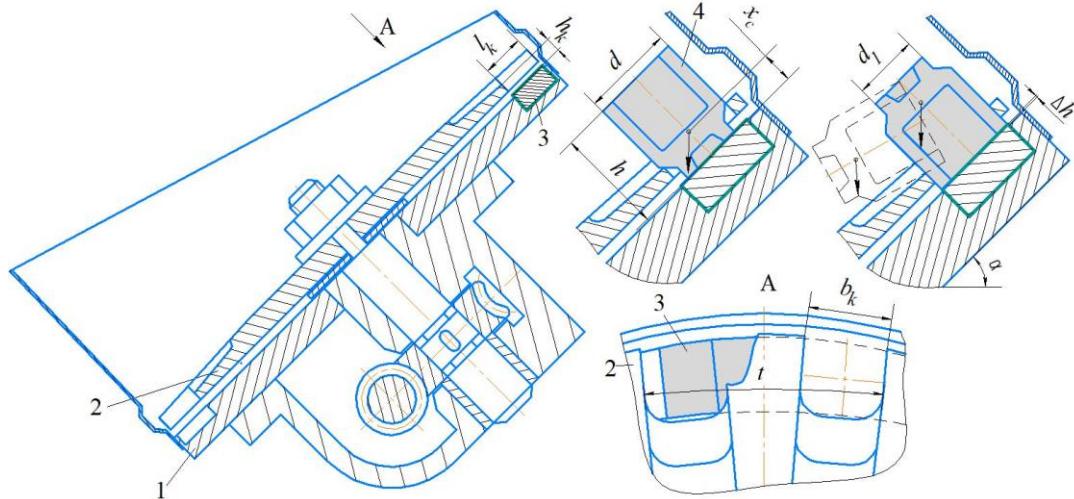


Рис. 3. Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для изделий в форме колпачка:
1 – основание бункера; 2 – диск с органами захвата; 3 – криволинейный копир; 4 – изделие в форме колпачка

Fig. 3. Improved hopper feeding-orienting device for cap-shaped products: 1 is hopper base; 2 is disc with gripping elements; 3 is curved cam; 4 is cap-shaped product

Для надежного функционирования усовершенствованного устройства необходимо определить диапазоны конструктивных параметров органов захвата изделий и условия их ориентирования с помощью криволинейного копира.

Захват изделий в бункерном загрузочном устройстве осуществляется в нижней части бункера. Для обеспечения захвата длина l_k и ширина b_k захватывающего органа определяются по известным формулам и зависят от высоты h и диаметра большего d торца изделия. Чем больше размеры захватывающего органа, тем больше вероятность захвата изделий, но при выборе их оптимальных размеров необходимо, чтобы в захватывающие органы одновременно не запали сразу несколько изделий.

Ориентирование изделий происходит в верхней части бункера. Чтобы неправильно захваченные органами захвата изделия выпали обратно в нижнюю часть бункера под действием силы тяжести, а правильно захваченные изделия остались в органах захвата, необходимо определить высоту h_k захватывающих органов. Высота h_k зависит от размеров изделия (высоты h , диаметров большего d и меньшего d_1 торцов, координаты центра масс x_c), угла наклона вращающегося диска α и высоты выступа копира Δh над неподвижным основанием и определяется условием

$$x_c - 0,5d_1 \cdot \cot \alpha + \Delta h \leq h_k \leq h - x_c - 0,5d_1 \cdot \tan \alpha - \Delta h. \quad (1)$$

Размер высоты захватывающих органов должен быть выбран из указанного диапазона в зависимости от параметров изделия и угла наклона бункера [13].

Это обеспечит надежное функционирование устройства при ориентировании изделий.

Для оценки производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства необходимо разработать математическую модель вероятности захвата. Методология комплексного подхода для оценки производительности и вероятности захвата приведена в работе [14].

Для того чтобы изделие отвечало требованиям качества по свойствам материала и размерам, необходимо реализовать комплекс мер в рамках новой методологии обеспечения качества.

Новая методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка

Новая методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка при автоматизации процессов их загрузки включает в себя следующие этапы (рис. 4).

Согласно представленной методологии, на первом этапе осуществляется определение контролируемых показателей качества изделий в форме колпачка, которые могут быть как количественными, так и качественными.

Построение математических моделей процессов производства и функционирования технологического оборудования позволяют определить свойства изделий, оптимальные параметры процесса и оборудования. Одновременно с этим создается цифровой двойник изделия [12], в который закладываются его геометрические размеры и свойства материала (например, пределы текучести и прочности) и который позволяет учесть нагружение фактическим давлением и оценить твердость изделия [13].



Рис. 4. Этапы методологии обеспечения качества изделий в форме колпачка

Fig. 4. Stages of cap-shaped product quality assurance methodology

Определение параметров технологического процесса и оборудования, влияющих на показатели качества, позволит обеспечить их значение в пределах поля допуска. При необходимости проектируется новый технологический процесс изготовления изделия с созданием его цифрового двойника.

После изготовления опытных партий с тщательным пооперационным контролем, позволяющим выявить и устранить недостатки технологии, собираются данные статистического контроля по каждому из контролируемых параметров изделия в форме колпачка. Сбор данных реализуется с применением современных оптических систем контроля, которые позволяют получить значения геометрических размеров с высокой точностью и скоростью измерения. Массив полученных данных позволяет обучить и построить искусственную нейронную сеть, применяе-

мую в дальнейшем для прогнозирования параметров качества.

Для прогнозирования параметров качества наиболее производительной искусственной нейронной сетью является многослойный персептрон. Применив его для прогнозирования наружного диаметра изделия в форме колпачка, на который влияют диаметр прутка, диаметр матрицы выдавливания, диаметры нижнего и верхнего пuhanсонов, получена нейронная сеть для прогнозирования наружного диаметра колпачка (рис. 5).

Применение на предприятии современных инспекционных контролирующих машин позволит оперативно осуществлять оценку качества большого количества изделий и своевременно принять корректирующее и управляющее воздействие на процесс в случае необходимости.

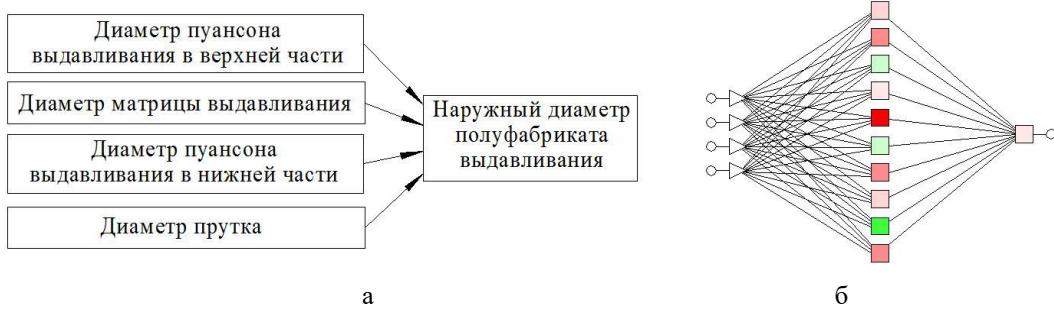


Рис. 5. Схема зависимости наружного диаметра изделий в форме колпачка от влияющих параметров (а) и прогнозирующая искусственная нейронная сеть (б)

Fig. 5. Diagram of dependence of external diameter of cap-shaped products on influencing parameters (a) and predictive artificial neural network (b)

Разработка математической модели производительности усовершенствованного устройства

Для прогнозирования и повышения производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства на начальных этапах проектирования возникают задачи определения вероятности захвата изделий η и разработки адекватных математических моделей производительности F , которые способны учесть все особенности функционирования устройства, включая вероятностный принцип его работы при захвате изделий:

$$F = \eta \cdot \frac{60v}{t}, \quad (2)$$

где t , v – шаг (см. рис. 3) и окружная скорость органов захвата.

Вероятность захвата η , согласно разработанной концепции, определяется выражением

$$\eta = p_i p_c (1 - \varepsilon \cdot v^4), \quad (3)$$

где p_i , p_c – вероятности нахождения изделий по направлению к органу захвата в положении, благоприятном для захвата, и вероятность того, что захвату не помешает взаимосцепляемость изделий; ε – коэффициент, определяемый предельной окружной скоростью органов захвата, как $v_{\text{пред}}$, при которой в карман не успеет запасть ни одно изделие.

Вероятность p_i зависит от той поверхности изделия, которой он должен упасть на вращающийся диск устройства, и той стороны изделия, которой он должен повернуться к органу захвата (рис. 6).

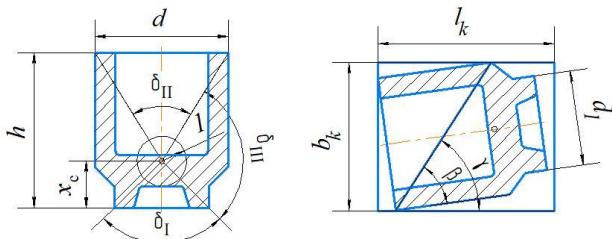


Рис. 6. Расчетные схемы для определения вероятности p_i

Fig. 6. Probability p_i calculation schemes

Каждая из сторон изделия характеризуется углом δ_i , а вероятность падения на данную сторону определяется как $p_i = 0,5(1 - \cos 0,5\delta_i)$. С помощью расчетной схемы (рис. 6, а) определяем:

$$\delta_I = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{4b^2}}},$$

$$\delta_{II} = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{4(1-b)^2}}},$$

$$\delta_{III} = 180 - 0,5(\delta_I + \delta_{II}), \quad (4)$$

где $a = d / h$, $b = x_c / h$, $c = d_1 / h$.

Затем необходимо определить вероятность $p_{i_{\text{max}}}$ и вероятность $p_{i_{\text{min}}}$, в которой углы γ и β определяются размерами кармана и изделия с помощью расчетной схемы (рис. 6, б):

$$p_{i_{\text{max}}} = p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} (\delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha}),$$

$$p_{i_{\text{min}}} = p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} (\gamma - \beta), \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения между изделиями и элементами вращающегося диска устройства.

Зона захвата изделий в усовершенствованном бункерном загрузочном устройстве определяется по формуле

$$\varphi_g = 2 \arccos \frac{\mu \cdot \sin 2\alpha + \mu \cdot \sqrt{\sin^2 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha \cdot (1 + \mu^2) \cdot \cos 2\alpha}}{2 \sin^2 \alpha \cdot (1 + \mu^2)}. \quad (6)$$

Вероятность p_i определяется по выражению

$$p_i = 1 - (1 - p_{i_{\text{max}}})^3 (1 - p_{i_{\text{min}}})^{\frac{R\varphi_g}{d}}, \quad (7)$$

где R – радиус диска в зоне расположения органов захвата.

Вероятность p_c определяется по выражению

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot \sum F_i} \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{\xi_{i_x}^2 + \xi_{i_y}^2} \cdot (F_1 + F_2)_i \right], \quad (8)$$

где F_i , $\sum_{i=1}^n F_i$ – площади каждой из n сторон изделия

и их сумма; ξ_i – допустимые углы, на которые можно повернуть два соприкасающихся различными поверхностями изделия по осям x (ξ_{i_x}) и y (ξ_{i_y}), без разъединения с учетом коэффициента трения между изделиями μ_0 .

Коэффициент $\varepsilon = \frac{1}{v_{\text{lim}}^4}$ в рассматриваемом усовершенствованном бункерном загрузочном устрой-

стве для изделий в форме колпачка определяется по выражению

$$\varepsilon = \frac{1}{v_{\text{lim}}^4} = \frac{1}{g^2 [a + 0,4x_c + 0,8\Delta - 0,2\sqrt{(\sqrt{5}d - 2\Delta + 4x_c)(\sqrt{5}d + 2\Delta + 4x_c)}]^2} \quad (9)$$

Обобщенная математическая модель производительности с учетом полученных выше выражений имеет следующий вид:

$$F = [1 - (1 - p_{i_{\max}})^3 (1 - p_{i_{\min}})^{\frac{R\Phi_g}{d}}] p_c (1 - \frac{v^4}{v_{\text{lim}}^4}) \cdot \frac{60v}{t}. \quad (10)$$

Методами компьютерного моделирования с помощью полученной математической модели вероятности захвата и производительности устройства было получено, что для изделий с соотношением a от 1,1 до 1,5 максимальная производительность устройства составляет от 160 до 300 шт./мин в зависимости от коэффициента трения.

Математические модели производительности усовершенствованных бункерных загрузочных устройств с врачающимися роликами для полимерных трехсоставных колпачков и ступенчатых изделий с визуализацией были представлены в работах [14, 15]. Полученные теоретически математические модели вероятности захвата и производительности с высокой точностью совпадали с моделями, полученными в результате экспериментальных исследований.

Заключение

В результате проведенных исследований была представлена методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка, которая может быть применима и к другим видам изделий массовых производств, а также концепция построения математических моделей вероятности захвата и производительности бункерных загрузочно-ориентирующих устройств на примере новых изделий, разработанных для повышения эффективности технологического процесса и требующих автоматизации процесса из загрузки в технологическое оборудование.

В результате анализа были сделаны следующие выводы. Применение перспективных статистических методов в совокупности с современным программным обеспечением с реализацией теории искусственных нейронных сетей, разработка и внедрение цифровых двойников позволяет выстроить на предприятиях систему управления качеством, соответствующую тенденциям развития производства в условиях цифровизации. Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство обеспечит надежное ориентирование изделий в форме колпачка при нахождении конструктивных параметров органов захвата в полученных диапазонах. Максимальная производительность усовершенствованного бункерного загрузочно-ориентирующего устройства для

изделий в форме колпачка с соотношением высоты к большему диаметру в диапазоне от 1,1 до 1,5 составляет от 160 до 300 шт./мин.

Список источников

1. Malykhina G.F., Guseva A.I., Militsyn A.V. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies: Advances in Economics, Business and Management Research // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019). 2019. C. 74–77.
2. Rozhok A.P., Zykova K.I., Suschev S.P., et al. The use of digital twin in the industrial sector // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World" 2021. C. 012032.
3. Управление качеством технологических процессов: монография / Т.Н. Антипова [и др.]. Королёв: Научный консультант, 2015. 189 с.
4. Пантиохин О.В., Васин С.А. Цифровые технологии в управлении качеством // Качество, инновации, образование. 2021. № 1. С. 22–27.
5. Пантиохин О.В., Пантиохина Е.В., Дьякова Э.В. Экономические аспекты управления качеством изделий массовых производств // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 502–507.
6. Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 17–22.
7. Методология реализации принципов встроенного качества / Клейменов С.И., Козловский В.Н., Клентак А.С., Антипова О.И. // Стандарты и качество. 2024. № 9. С. 94–100.
8. Горелов А.С. Концепция построения систем автоматизированного статистического контроля продукции массовых производств // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2019. С. 300–303.
9. Морозов В.Б., Горелов А.С. Планирование непрерывного статистического контроля с учетом надежности оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 24–29.
10. Лялин В.М., Пещеров А.В. Анализ процесса высокоскоростной полугорячей штамповки выдавливанием // Теория и практика производства проката: сб. науч. тр. Липецк: ЛГТУ, 2001. С. 246–251.
11. Патент на полезную модель № 221163 РФ. Бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для объемных заготовок с асимметрией по торцам / В. В. Прейс, Е. В. Пантиохина, Э. В. Дьякова. Заявка № 2023108057 от 30.03.2023; опубл. 23.10.2023, Бюл. № 30.
12. Дьякова Э.В. Способы ориентирования близких к равноразмерным деталей с асимметрией по торцам в механических бункерных загрузочных устройствах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 10. С. 105–110.

13. Дьякова Э.В., Пантиухина Е.В. Разработка конструктивных ограничений на параметры захватывающих и ориентирующих органов дискового бункерного загрузочного устройства для асимметричных деталей, близких к равноразмерным // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 20. С. 125-130.
14. Васин С.А., Пантиухина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. № 3. С. 64-88.
7. Kleimenov S.I., Kozlovskiy V.N., Klentak A.S., Antipova O.I. Methodology for implementing the principles of embedded quality. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2024;(9):94-100 (In Russ.).
8. Gorelov A.S. The concept of building automated statistical control systems for mass production products. *Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt obespecheniya kachestva v mashinostroenii: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Domestic and foreign experience of quality assurance in mechanical engineering: collection of reports of All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tula, 2019. Pp. 300-303. (In Russ.).
9. Morozov V.B., Gorelov A.S. Planning of continuous statistical monitoring, taking into account the reliability of the equipment. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences]. 2022;(4):24-29. (In Russ.).
10. Lyalin V.M., Peshcherov A.V. Analysis of the process of high-speed semi-hot stamping by extrusion. *Teoriya i praktika proizvodstva prokata: sb. nauch. trudov* [Theory and practice of rolled products production: collection of scientific papers]. Lipetsk: LGTU, 2001. Pp. 246-251. (In Russ.).
11. Preys V.V., Pantyukhina E.V., Dyakova E.V. *Bunkernoe zagruzochno-orientiruyushchee ustroystvo dlya obemnyh zagotovok s asimmetriey po tortsam* [Hopper loading and orienting device for bulk workpieces with asymmetry at the ends]. Patent RU, no. 221163, 2023.
12. Dyakova E.V. Methods of orienting parts close to equal-sized with asymmetry at the ends in mechanical hopper loading devices. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences]. 2021;(10):105-110 (In Russ.).
13. Dyakova E.V., Pantyukhina E.V. Development of design constraints on the parameters of the gripping and orienting bodies of a disk hopper loading device for asymmetric parts close to equivalent dimensions. *Transportnoe, gornoie i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2023;(20):125-130 (In Russ.).
14. Vasin S.A., Pantyukhina E.V. A method for determining the probability of capturing asymmetric parts of the shape of bodies of rotation in disk hopper loading and orienting devices. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of MSTU named after N.E. Bauman. Mechanical Engineering Series]. 2023;(3):64-88 (In Russ.).

References

1. Malykhina G.F., Guseva A.I., Miltsyn A.V. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies: Advances in Economics, Business and Management Research. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019). 2019:74-77.
2. Rozhok A.P., Zykova K.I., Suschev S.P., et al. The use of digital twin in the industrial sector: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World. 2021:012032.
3. Antipova T.N. et al. *Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov: monografiya* [Quality management of technological processes: monograph]. Korolyov: Nauchnyi consultant, 2015,189 p. (In Russ.)
4. Pantyukhin O.V., Vasin S.A. Digital technologies in quality management. *Kachestvo, innovatsii, obrazovanie* [Quality, innovation, education]. 2021;(1):22-27 (In Russ.).
5. Pantyukhin O.V., Pantyukhina E.V., Dyakova E.V. Economic aspects of quality management of mass-produced products. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle* [News of the Tula State University. Earth Sciences]. 2022;(1):502-507 (In Russ.).
6. Preys V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for assembling multi-element products. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument engineering]. 2003;(10):17-22 (In Russ.).

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 01.09.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 01/09/2025; published 25/12/2025

Пантиухина Елена Викторовна – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.

Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Богодяж Артем Евгеньевич – соискатель,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: angry@narod.ru.

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор-консультант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Бахно Александр Львович – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», Тула, Россия.
Email: Bahno.al@tulatoz.ru.

Elena V. Pantyukhina – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Artem E. Bogodyazh – Degree-Seeking Applicant,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: angry@narod.ru.

Sergey A. Vasin – DrSc (Eng.), Consulting Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Alexander L. Bakhno - PhD (Eng.), First Deputy General Director,
PJSC Imperial Tula Arms Plant, Tula, Russia.
Email: Bahno.al@tulatoz.ru.