

УДК 621.9.06

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОТСУТСТВИЯ ПОМЕХ ОТ ВЗАИМОСЦЕПЛЯЕМОСТИ АСИММЕТРИЧНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ЗАХВАТЕ В БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

© 2025 А.Л. Бахно¹, Е.В. Пантюхина², С.А. Васин², А.А. Маликов²

¹ ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», г. Тула, Россия

² Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Статья поступила в редакцию 15.08.2025

В статье приводится описание вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости асимметричных стержневых заготовок при их захвате в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах. Рассматриваются этапы построения математических моделей вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости стержневых заготовок с явной и неявной асимметрией. Приведены полученные математические зависимости вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости стержневых цилиндрических заготовок с явной асимметрией и имеющих неявную асимметрию заготовок трех форм – ступенчатых цилиндрических, со сферическим торцом и торцом в виде усеченного конуса. Представленные выражения для описания всех коэффициентов математической модели позволяют оценить вероятность отсутствия помех от взаимосцепляемости заготовок при их захвате в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах в зависимости от геометрических параметров заготовок и коэффициента трения между их поверхностями при их различных сочетаниях.

Ключевые слова: бункерное загрузочно-ориентирующее устройство, взаимосцепляемость заготовок, вероятность захвата, ориентирование заготовок.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-164-170

EDN: HFTKLY

ВВЕДЕНИЕ

При построении математических моделей вероятности захвата заготовок в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах (БЗУ) важную роль играет взаимосцепляемость заготовок друг с другом [1–3]. В зависимости от формы заготовок, наличия в заготовках внутренних полостей, выступов и прочих особенностей взаимосцепляемость заготовок может приводить к существенному снижению их вероятности захвата и производительности БЗУ. В некоторых случаях для снижения взаимосцепляемости в конструкциях БЗУ применяются дополнительные конструктивные элементы, которые ворошат заготовки, снижая значения данного показателя. Поэтому очень важно на ранних этапах проектирования БЗУ для заданной заготовки оценить значения вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости заготовок, приводящих к снижению производительности БЗУ, для принятия тех или иных конструкторских решений.

Для математического описания вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости, учитывающая влияние на данный параметр геометрических параметров загружаемых заготовок и значения коэффициента трения между ними, была предложена зависимость [4], которая в дальнейшем была принята за основу концепции построения математических моделей вероятности захвата и производительности механических дисковых БЗУ [5, 6]. Данная концепция нашла широкое применение при прогнозировании производительности БЗУ и оценки ее значений в различных отраслях промышленности на начальных этапах проектирования БЗУ и при их эксплуатации [7–10].

Бахно Александр Львович, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора.

E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru

Пантюхина Елена Викторовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленная автоматика и робототехника». E-mail: e.v.pant@mail.ru

Васин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры «Технология машиностроения». E-mail: vasin_sa53@mail.ru

Маликов Андрей Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения». E-mail: tppizi@yandex.ru

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТСУТСТВИЯ ПОМЕХ ОТ ВЗАИМОСЦЕПЛЯЕМОСТИ ДЛЯ ЗАГОТОВОК С ЯВНОЙ АСИММЕТРИЕЙ

Для определения вероятности p_c определяются площади всех поверхностей заготовки, а затем рассматриваются все возможные пары их сопряжений; при этом учитываются сопряжения только тех поверхностей заготовок, которые возможно сочетать без разъединения, что характеризуется углом p_c , который позволяет оценить свободу перемещения всех пар сопрягающихся между собой поверхностей заготовки в плоскостях x и y , а также учесть влияние коэффициентов трения заготовок между собой при их захвате.

Вероятность p_c в математической модели вероятности захвата записывается формулой:

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n \cdot (F_I + F_{II} + \dots + F_V)} \sum_{i=1}^{n^2} \left[\left\{ \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right\}_{I-II} \times (F_I + F_{II})_i + \dots \right]_i, \quad (1)$$

где n – количество поверхностей заготовки (например, $n = 5$ для цилиндрических ступенчатых заготовок) и число n^2 их сочетаний; $F_I, F_{II}, \dots, F_V$ – площади всех поверхностей заготовки, m^2 ; ξ_{xi}, ξ_{yi} – углы возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей с площадями F_I и F_{II} без отрыва по плоскостям x и y , соответственно, как показано на рис. 1 [11], на примере варианта соприкосновения I–II (аналогично записываются выражения для каждой пары всех соприкасающихся поверхностей заготовки, в данном случае еще 24).

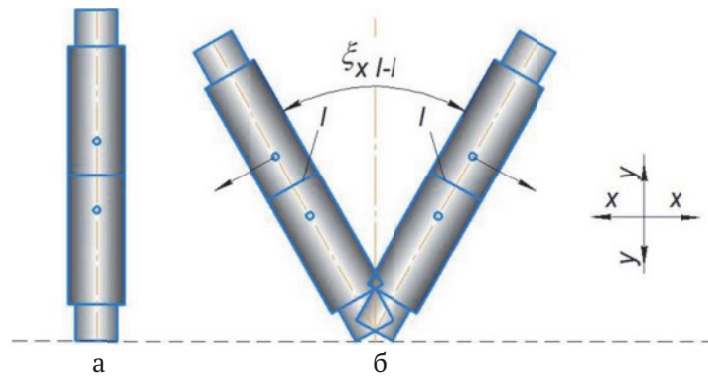


Рис. 1. Расчетная схема определения углов ξ_{xi}, ξ_{yi} возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей двух ступенчатых цилиндрических заготовок на примере сочетания I–I:
а – в начальный момент; б – при возможном повороте

Выразив площадь каждой из пяти поверхностей заготовки через ее геометрические параметры, получим сумму всех площадей $\Sigma F = F_I + F_{II} + \dots + F_V$ поверхностей:

$$\Sigma F = \frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi d_2^2}{4} + \pi d_1 l_1 + \pi d_2 (l - l_1) + \left(\frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_2^2}{4} \right), \quad (2)$$

в которой каждое слагаемое описывает площадь поверхностей I, II, ..., V заготовок соответственно. Выполнив преобразования данного выражения, получим

$$\Sigma F = \frac{\pi}{2} [d_1^2 + 2d_1 l_1 + 2d_2 (l - l_1)].$$

На рис. 2 показаны все существующие сочетания поверхностей заготовок.

Для определения углов $\xi_{xi} = \arctan \mu_x$ и $\xi_{yi} = \arctan \mu_y$ (где μ_x и μ_y – коэффициенты трения каждой пары поверхностей заготовок при движении по осям x и y соответственно) при каждом случае соприкосновения предлагается табл. 1 (в таблице в качестве допущения принято значение коэффициента трения μ_0 между поверхностями заготовок одинаковым для всех сочетаний, так как заготовка изготовлена из одного металла).

Тогда выражение для вероятности p_c с учетом выражения (2) и входящих в него слагаемых, соответствующих площадям каждой поверхности заготовки, а также табл. 1, будет преобразовано в следующий вид:

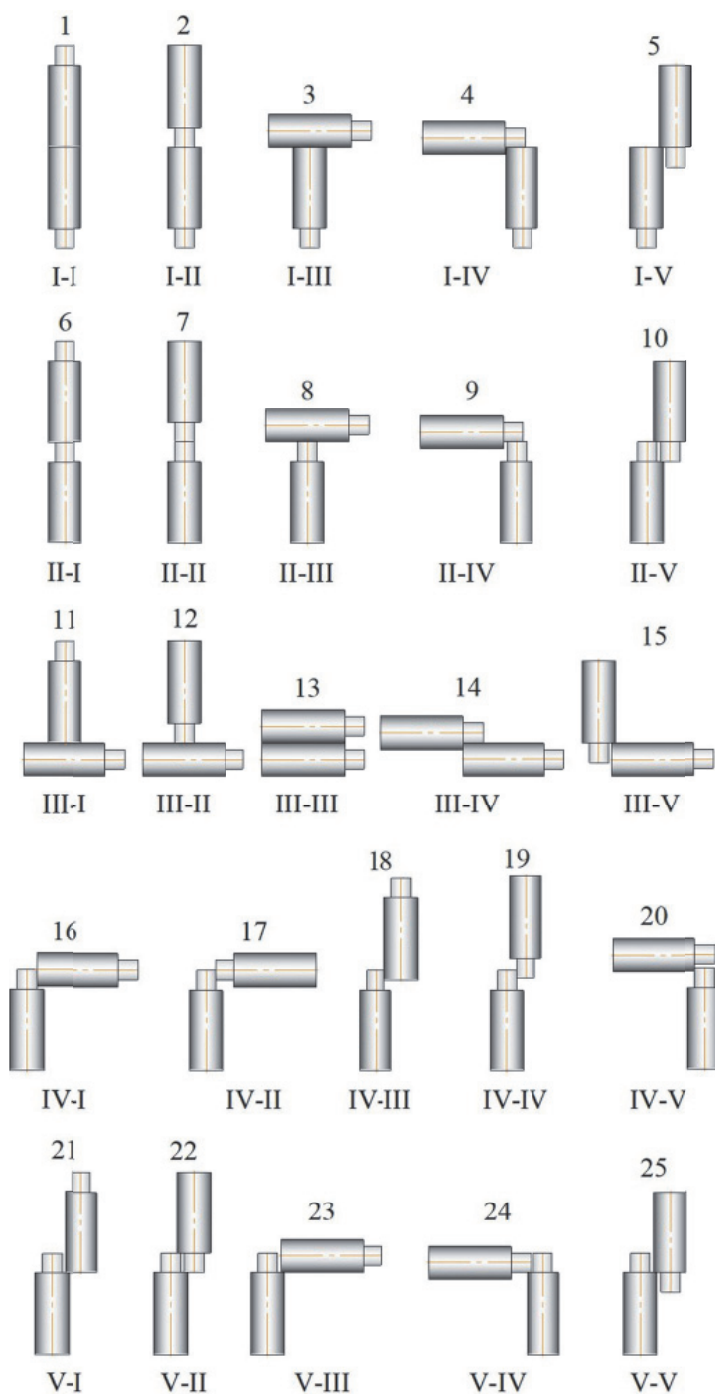


Рис. 2. Сочетания поверхностей цилиндрических ступенчатых заготовок

$$p_c = 1 - \frac{1}{\frac{25\sqrt{2}\pi^2}{2}[d_1^2 + 2d_1l_1 + 2d_2(l-l_1)]} \times \left[\sqrt{2} \cdot \arctan(\mu_0) \cdot (6F_I + 6F_{II} + 6F_V) + \arctan(\mu_0) \cdot (4F_I + 4F_{II} + 10F_{III} + 10F_{IV} + 4F_V) \right].$$

Заменяв каждую площадь выражением, получим вероятность для цилиндрических ступенчатых заготовок с явной асимметрией:

$$p_c = 1 - \frac{\arctan(\mu_0)}{\frac{25\sqrt{2}\pi}{2}[d_1^2 + 2d_1l_1 + 2d_2(l-l_1)]} \cdot \left[\sqrt{2} \cdot 3d_1^2 + 2d_1^2 + 10d_1l_1 + 10d_2(l-l_1) \right]. \quad (3)$$

Как показали исследования, выраженную роль оказывает на вероятность P_c коэффициент трения μ_0 ; тем не менее, его влияние составляет менее чем 1 %.

Таблица 1. Выражения для вычисления $\sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2}$ для каждого из сочетаний поверхностей заготовок с явной асимметрией

Сочетание	I-I	I-II	I-III	I-IV	I-V
Параметр	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$
Сочетание	II-I	II-II	II-III	II-IV	II-V
Параметр	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$
Сочетание	III-I	III-II	III-III	III-IV	III-V
Параметр	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$
Сочетание	IV-I	IV-II	IV-III	IV-IV	IV-V
Параметр	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$
Сочетание	V-I	V-II	V-III	V-IV	V-V
Параметр	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$	$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТСУТСТВИЯ ПОМЕХ ОТ ВЗАИМОСЦЕПЛЯЕМОСТИ ДЛЯ ЗАГОТОВОК С НЕЯВНОЙ АСИММЕТРИЕЙ

Для определения вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости p_c для заготовок с неявной асимметрией, имеющие три образующие их поверхности ($n = 3$), которые могут соприкасаться следующими вариантами их сочетаний ($n^2 = 9$ вариантов): I-I, I-II, II-II, II-I, I-III, II-III, III-I, III-II, III-III получим, что каждый из этих вариантов характеризуется также максимально допустимым углом ξ . В случае прилегания гладких и ровных поверхностей заготовок $\xi_{xi} = \xi_{yi} = \arctan(\mu_0)$. При контакте сферических или конических поверхностей с другими поверхностями заготовок $\xi_{xi} = \arctan(\mu_0)$, $\xi_{yi} = 0$. С учетом вышеизложенного, выражения (1) и формул в табл. 2 для заготовок с неявной асимметрией получим:

для цилиндрических ступенчатых заготовок:

$$p_c = 1 - \frac{4 \arctan \mu_0 \cdot (d_1^2 \cdot (\sqrt{2} + 0,5) + d_2^2 \cdot (\sqrt{2} + 0,5) + 6d_1l)}{3\sqrt{2} \cdot \pi(d_1^2 + d_2^2 + 4d_1l)},$$

для заготовок со сферическим торцом

$$p_c^{cf} = 1 - \frac{4 \arctan \mu_0 \cdot (0,5d_1^2 \cdot (\sqrt{2} + 1) + 4rh)}{3\sqrt{2} \cdot \pi(d_1^2 + 8rh + 4d_1l_1)},$$

для заготовок с коническим торцом

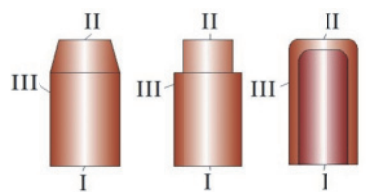
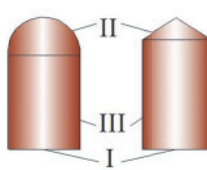
$$p_c^k = 1 - \frac{4 \arctan \mu_0 \cdot [0,5d_1 \cdot (\sqrt{2} + 1) + 2l_1]}{3\sqrt{2} \cdot \pi(d_1 + 2\sqrt{0,25d_1^2 + h^2} + 4l_1)}.$$

На рис. 3 представлены графики для определения вероятностей p_c в зависимости от коэффициентов $a = d_1 / l$, $c = d_2 / l$, $f = l_1 / l$ для различных заготовок.

На графиках, описывающих вероятности отсутствия помех со стороны взаимосцепляемости от заменяющего коэффициента $a = d_1 / l$, представлены две вертикальные оси: справа – ось вероятности p_c для цилиндрических ступенчатых заготовок, а слева – ось p_c^{cf} для заготовок со сферическим торцом и ось p_c^k для заготовок с коническим торцом.

Таким образом, вероятность p_c позволяет учесть влияние на вероятность захвата заготовок и производительность усовершенствованного БЗУ геометрических параметров стержневых цилиндрических ступенчатых заготовок и коэффициента трения между ними.

Таблица 2. Выражения для вычисления $\sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2}$
для каждого из сочетаний поверхностей заготовок с неявной асимметрией

Вид заготовки					
					
Варианты сочетания поверхностей					
I-I	I-II	II-II	I-I	II-II	I-III
$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$			$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	0	$\arctan(\mu_0)$
II-I	I-III	II-III	II-I	I-II	II-III
$\sqrt{2} \times \arctan(\mu_0)$	$\arctan(\mu_0)$		0		
III-I	III-II	III-III	III-I	III-II	III-III
$\arctan(\mu_0)$			$\arctan(\mu_0)$	0	

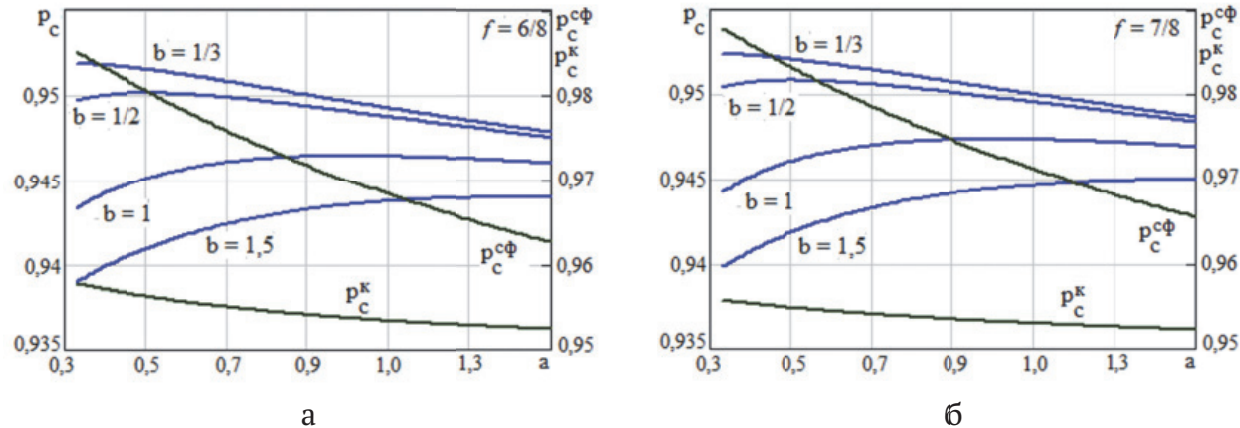


Рис. 3. Графики зависимостей вероятности p_c для различных заготовок с неявной асимметрией при $f = 6/8$ (а) и $f = 7/8$ (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое описание вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости при их захвате принимает значения для стержневых асимметричных заготовок в диапазоне от 0,932 до 0,964 в зависимости от их формы, что приводит к незначительному снижению производительности механических дисковых БЗУ. Для ее повышения целесообразно в бункере БЗУ устанавливать дополнительные конструктивные элементы, которые ворошат заготовки, снижая значения вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости заготовок. Кроме этого можно использовать различные методы для снижения коэффициента трения между заготовками при их взаимосцепляемости. Это также повлияет и на вероятность нахождения заготовок в благоприятном для захвата положении, снизив коэффициент трения между заготовками и рабочими органами БЗУ, приведя к повышению вероятности захвата и производительности БЗУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантюхина, Е.В. Факторы, влияющие на производительность механических дисковых бункерных грузочно-ориентирующих устройств / Е.В. Пантюхина, С.А. Васин, С.Н. Шевченко, А.А. Борисов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – № 3. – С. 99–104.

2. *Пантюхина, Е.В.* Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств / Е.В. Пантюхина // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. Научный редактор П.Д. Балакин. – 2020. – С. 380–388.
3. *Пантюхина, Е.В.* Варианты расчета вероятности отсутствия помех от взаимосцепляемости деталей при захвате / Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 8. – С. 348–352.
4. *Медвидь, М.В.* Автоматические ориентирующие загрузочные устройства / М.В. Медвидь. – М.: Машгиз, 1963. – 299 с.
5. *Васин, С.А.* Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 64–88.
6. *Pantyukhina E.V.* Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1546 (2020) 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.
7. *Хачатурян, А.В.* Математическая модель фактической производительности зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для пустотелых деталей / А.В. Хачатурян, Е.В. Пантюхина, В.В. Прейс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 98–110.
8. *Бурцев, Д.В.* Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с радиальными профильными гнездами / Д.В. Бурцев, Е.В. Давыдова, В.В. Прейс // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 9. – С. 33–36.
9. *Давыдова, Е.В.* Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с тангенциальными профильными гнездами / Е.В. Давыдова, В.В. Прейс, К.Н. Провоторова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10. – С. 7–10.
10. *Борисов, А.А.* Математическая модель и теоретическое исследование производительности бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для сложных ступенчатых заготовок / А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 551–557.
11. *Пантюхина, Е.В.* Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами / Е.В. Пантюхина, А.А. Борисов, С.А. Васин, А.С. Клентак // iPolytech Journal. – 2024. – Т. 28. – № 4. – С. 466–476.

PROCEDURE FOR DETERMINATION OF PROBABILITY OF ABSENCE OF INTERFERENCE FROM INTERLOCKING OF ASYMMETRIC ROD BLANKS DURING GRIPPING IN HOPPER FEEDING-ORIENTING DEVICES

© 2025 A.L. Bakhno¹, E.V. Pantyukhina², S.A. Vasin², A.A. Malikov²

¹ PJSC “Imperial Tula Arms Plant”, Tula, Russia

² Tula State University, Tula, Russia

The article describes the probability of absence of interference from interlocking of asymmetric rod blanks during their gripping in mechanical disk hopper feeding-orienting devices. Stages of construction of mathematical models of probability of absence of interference from interlocking of rod billets with explicit and implicit asymmetry are considered. Obtained mathematical dependences of probability of absence of interference from interlocking of rod cylindrical blanks with explicit asymmetry and having implicit asymmetry of blanks of three shapes – stepped cylindrical, with spherical end and end in the form of truncated cone are given. Presented expressions for description of all coefficients of mathematical model make it possible to estimate probability of absence of interference from interlocking of blanks during their gripping in mechanical disk hopper feeding-orienting devices depending on geometric parameters of blanks and coefficient of friction between their surfaces at their various combinations.

Key words: hopper feeding-orienting device, interlocking of workpieces, probability of gripping, orientation of workpieces.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-164-170

EDN: HFTKLY

REFERENCES

1. *Pantyuhina, E.V.* Faktory, vliyayushchie na proizvoditel'nost' mekhanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushchih ustroystv / E.V. Pantyuhina, S.A. Vasin, S.N. Shevchenko, A.A. Borisov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2024. – № 3. – pp. 99–104.
2. *Pantyuhina, E.V.* Metodologiya kompleksnogo podhoda dlya ocenki proizvoditel'nosti mekhanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochnykh ustroystv / E.V. Pantyuhina // V sbornike: Problemy mashinovedeniya. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Nauchnyj redaktor P.D. Balakin. – 2020. – pp. 380–388.

3. *Pantuyuhina, E.V.* Varianty rascheta veroyatnosti otsutstviya pomekh ot vzaimosceplyaemosti detalej pri zahvate / E.V. Pantuyuhina, I.V. Puzikov // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* – 2022. – № 8. – pp. 348–352.
4. *Medvid', M.V.* Avtomaticheskie orientiruyushchie zagruzochnye ustrojstva/ M.V. Medvid'. – M.: Mashgiz, 1963. – 299 p.
5. *Vasin, S.A.* Metodika opredeleniya veroyatnosti zahvata asimmetrichnyh detalej formy tel vrashcheniya v diskovyh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushchih ustrojstvakh / S.A. Vasin, E.V. Pantuyuhina // *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye.* – 2023. – № 3. – pp. 64–88.
6. *Pantuyukhina E.V.* Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1546 (2020) 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.
7. *Hachaturyan, A.V.* Matematicheskaya model' fakticheskoy proizvoditel'nosti zubchatogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva s kol'cevim orientatorom dlya pustotelyh detalej / A.V. Hachaturyan, E.V. Pantuyuhina, V.V. Prejs // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* – 2019. – № 7. – pp. 98–110.
8. *Burcev, D.V.* Matematicheskaya model' proizvoditel'nosti diskovogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva s radial'nymi profil'nymi gnezdami / D.V. Burcev, E.V. Davydova, V.V. Prejs // *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii.* – 2014. – № 9. – pp. 33–36
9. *Davydova, E.V.* Matematicheskaya model' proizvoditel'nosti diskovogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva s tangencial'nymi profil'nymi gnezdami / E.V. Davydova, V.V. Prejs, K.N. Provotorova // *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii.* – 2014. – №10. – pp. 7–10.
10. *Borisov, A.A.* Matematicheskaya model' i teoreticheskoe issledovanie proizvoditel'nosti bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya slozhnykh stupenchatykh zagotovok / A.A. Borisov, S.A. Vasin, E.V. Pantuyuhina // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* – 2025. – № 2. – pp. 551–557.
11. *Pantuyuhina, E.V.* Matematicheskoe opisanie veroyatnosti zahvata sterzhnevyykh stupenchatykh zagotovok v bunkernykh zagruzochno-orientiruyushchih ustrojstvakh s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami / E.V. Pantuyuhina, A.A. Borisov, C.A. Vasin, A.S. Klentak // *iPolytech Journal.* – 2024. – T. 28. – № 4. – pp. 466– 476.

Alexander Bakhno, Candidate of Technical Sciences, First Deputy General Director. E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru

Elena Pantuyukhina, Doctor of Technical, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Automation and Robotics. E-mail: e.v.pant@mail.ru

Sergey Vasin, Doctor of Technical, Professor, Professor-Consultant of the Department of Engineering Technology. E-mail: vasin_sa53@mail.ru

Andrey Malikov, Doctor of Technical, Professor, Head of the Department of Engineering Technology. E-mail: tppizi@yandex.ru