

УДК 531.11

doi:10.18720/SPBPU/2/id-113

А.Н. Стариков

САМОТОРМОЖЕНИЕ ЦАНГОВОГО МЕХАНИЗМА



Альберт Николаевич Стариков,
Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г Столетовых, Россия, Владимир
Тел.: (0922) 479-636, E-mail: alstars@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена определению условий фиксации металлорежущего инструмента. Анализ ведётся с позиций теории самоторможения механизмов. Рассматривается последовательная компоновка составного механизма, основанного на простейших механизмах, *наклонная плоскость* и *клиновой механизм*. Получены аналитические зависимости для определения момента затягивания гайки цангового механизма для фиксации инструмента с требуемым запасом по самоторможению как по вращению, так и по осевому смещению.

Ключевые слова: самоторможение, механизм наклонная плоскость, клиновая пара.

Введение

Повышение качества функционирования технологической оснастки есть актуальная задача машиностроения. Цанговые соединения предназначены для быстрой и надёжной фиксации инструмента. В материалах [1-3] рассмотрен теория и методы расчёта данных устройств.

Поскольку здесь нет отдельных тормозных устройств, то качественная оценка стопорения фрезы в цанговом патроне можно рассматривать по характеристике надёжность самоторможения механизма. Изучение данного вопроса представлено как в трудах российских учёных: В. В. Панюхина [4], А. И. Турпаева [5], В. Л. Вейца [6-9], Н. И. Левитский [10] Н. И. Колчина

[11], и др., так и зарубежных: Роано (Швейцария) [12]; Поппер (Израиль) [13]; И.Д. Хоуэлл (США), Мюнстер (ФРГ), Метраль, ЛеБера (Франция) [14].

Научный подход к теории данного вопроса уходит во времена Леонардо-да-Винчи, Гийома Амонтона Огюстена Кулона, [15-17].

В современных источниках уместно отметить работы как фундаментального, – П. А. Андриенко [18], В. И. Побжелко [19], так и прикладного характера, – А. А. Суханов [20, 21], а также [22-28]. Работы А. А. Суханова наиболее близки к области научных интересов автора: теория взаимодействия тел по плоскости.

Целью исследования ставится повышение прогнозируемости надёжности фиксации инструмента. Задачами являются:

- рассмотрение самоторможения фрезы в цанговом патроне методом Ассура, – метода разложения на простейшие.
- получение аналитических зависимостей запаса надёжности фиксации инструмента, – запас по самоторможению – в тангенциальном и осевом направлениях.

Методы

Цанговый механизм является составным, в котором используется клиновой механизм для зажима вала инструмента с целью исключения его проскальзывания относительно патрона, – как по вращению, так и по осевому движению, рис. 1

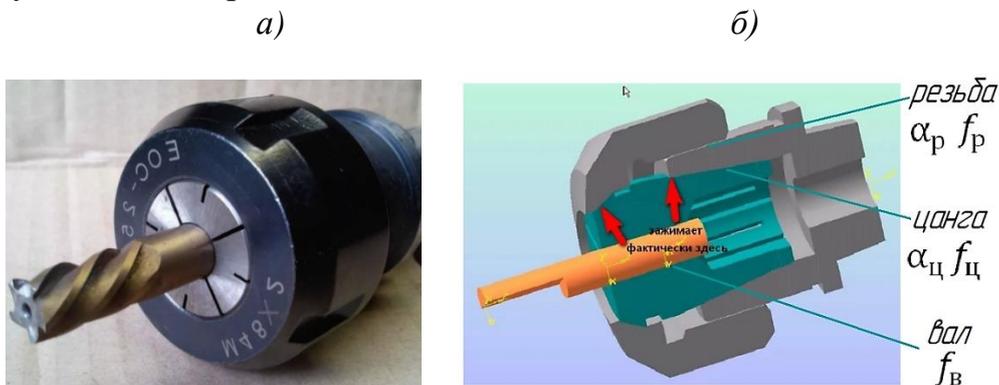


Рис. 1. Цанговое соединение (механизм)
а) фото; б) 3D-модель

Принято полагать, что основным функциональным элементом, определяющим свойства данного устройства, является конусная разрезная втулка. Главным параметром которой выступает угол скоса цанги α_c , рис. 2.

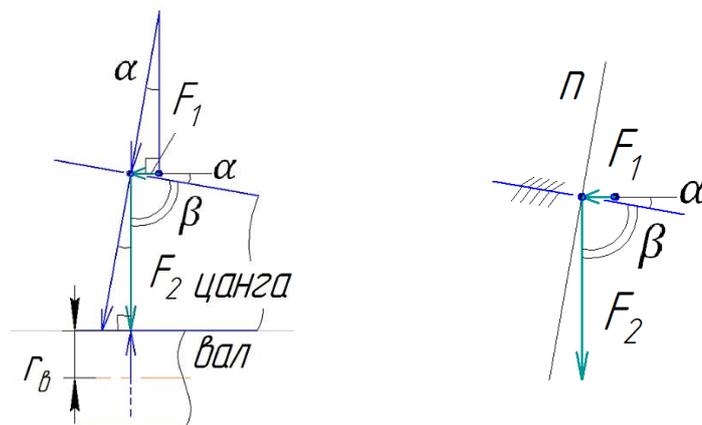


Рис. 2. Силовая схема цангового зажима
 F_1 – сила осевой затяжки цанги;
 F_2 – сила воздействия на вал инструмента

Силовой баланс по условию «непроворачивания» вала инструмента относительно цанги будет:

$$M_{\text{вал}} \leq F_{\text{тр}} r_{\text{в}} \varphi_{\text{в}},$$

где $M_{\text{вал}}$ – момент на валу, который необходимо обеспечить;

$r_{\text{в}}$ – радиус вала;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения в месте контакта вал-цанга, $F_{\text{тр}} = f_{\text{в}} F_2$, рис. 2;

$f_{\text{в}}$ – коэффициент трения пары вал-цанга;

$\varphi_{\text{в}}$ – коэффициент запаса, – во сколько раз удерживающий момент больше требуемого от проворачивания в сопряжении вал-цанга, – запас по самоторможению вала в цанге;

Сила осевого воздействия цанги F_1 и сила воздействия на вал инструмента F_2 связаны соотношением

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{1 - f \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}}{f + \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}} \quad (1)$$

Сила F_1 , в свою очередь, также является следствием работы клинового механизма, – гайки, затягивающей цангу.

Применяя метод разбиения на простейшие и номенклатуру простейших механизмов, [28], можно представить синтез цангового механизма следующим образом, рис. 3.

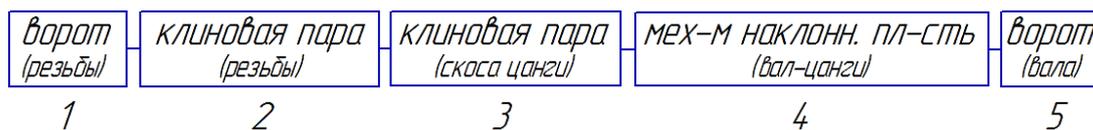


Рис. 3. Разложение цангового механизма на составляющие

Основным функционалом цангового механизма (в целом) является быстросъемность инструмента и отсутствие проскальзывания его вала при работе. Это достигается синтезом через последовательную компоновку трёх простейших механизмов:

- рис. 3, п. 2 – *клиновой механизм* резьбы гайка-винт с уверенным самоторможением;
- п. 3 – *клиновья пара* скоса цанги. Из практики известно, что здесь имеет место граничное состояние по самоторможению. При незатянутой гайке фиксация инструмента имеется, но при вибрации во время работы или легкого бокового удара по цанге – соединение нарушается;
- п. 4 – *механизм наклонная плоскость*, который перестаёт быть подвижным и входит во внутреннюю область равновесия, с необходимым запасом по удержанию вала инструмента, вследствие действия двух выше обозначенных механизмов.

Результаты

Общая аналитическая зависимость передачи усилий от затягивания гайки цанги к фиксации вала по вращению будет выглядеть следующим образом:

$$M_3 \cdot \frac{1}{r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{ц} \operatorname{tg} \alpha_{ц}}{f_{ц} + \operatorname{tg} \alpha_{ц}} \cdot f_v \cdot r_v \cdot \frac{1}{\varphi_v} = M_{\text{вал}} \quad (2)$$

где M_3 – момент затяжки в резьбе гайки (ключом, приводом);

f_p – коэффициент трения в резьбе затягивающей гайки, рис. 1, б;

α_p – средний угол подъёма резьбы (угол профиля резьбы не учитывается);

$f_{ц}$ – коэффициент трения в паре гайка-цанга;

$\alpha_{ц}$ – угол скоса поверхности цанги;

f_v – коэффициент трения вал-цанга;

r_v – радиус вала;

φ_B – запас по самоторможению на валу

$M_{\text{вал}}$ – момент на валу, который необходимо обеспечить.

Из (2) можно определить необходимый момент затяжки гайки цанги, как функции от величины момента фиксации инструмента

$$M_3 = M_{\text{вал}} \cdot \left(\frac{r_B}{r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}} \cdot f_B \cdot \frac{1}{\varphi_B} \right)^{-1}, \quad (3)$$

С определённой степенью допущения можно полагать, что $f_p = f_{\text{ц}} = f_B$. Зная или задавая требуемый запас по самоторможению φ_B можно определить необходимый момент затягивания гайки для известного нагрузочного момента на инструменте.

Рассмотрим детально действие этих трёх механизмов в соответствии с кинематической последовательностью их действия.

Клиновая пара резьбы, рис. 3 – п. 2.

Запас по самоторможению относительный выглядит следующим образом

$$\varphi_p = \frac{2f_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p}. \quad (4)$$

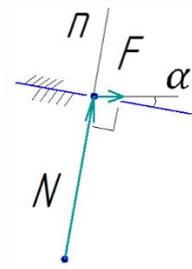
Под ним понимается – во сколько величина потенциальной силы трения больше реальной. Вывод здесь не приводится.

Полагается, что нет дополнительного подпиряющего воздействия со стороны затягивающей цангу гайки. Как, например, включённый двигатель привода или ключ, оставленный с пред натягом по закручиванию.

Этот механизм не участвует непосредственно в передаче вращательного движения. Тем ни менее он создаёт осевое усилие для клинового механизма скоса цанги п. 3, рис. 3, – для зажима вала инструмента, – п. 4;

Клиновая пара скоса цанги резьбы, рис. 3 – п. 3.

Для случая отсутствия подпиряющей гайки запас по самоторможению в цанге будет



$$\varphi_{\text{ц}} = f_{\text{ц}} \operatorname{ctg} \alpha_{\text{ц}} \quad (5)$$

Этот способ фиксации инструмента применяется в конусных посадках, например – конус Морзе у свёрл, рис. 4.

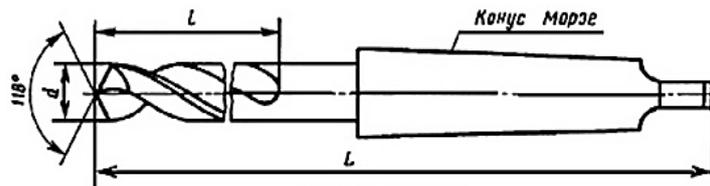


Рис. 4. Конусная посадка сверла

Для цангового же механизма имеет место подпирающая гайка. Этот факт необходимо учитывать. С учётом формулы (1) получим

$$\varphi_{\text{ц}} = \frac{f_{\text{ц}} F_2 \cos \alpha_{\text{ц}}}{F_2 \sin \alpha_{\text{ц}} - F_1} \quad (6)$$

где с учётом формулы (2) получим,

$$F_2 = M_3 \cdot \frac{1}{r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + \operatorname{tg} \alpha_{\text{ц}}}, \quad (7)$$

$$F_1 = M_3 \cdot \frac{1}{r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p}. \quad (8)$$

Следует отметить, что гайка, подпирающая цангу, существенно усиливает фиксирующие свойства конуса цанги. В связи с этим углы скоса цанги в случае «с гайкой» делают большими, – 8,3° (конус 7:24) и более; в отличии от «без гайки» (конус Морзе), – порядка 1,5° (конус 1:20).

Механизм наклонной плоскости, рис. 3 – п. 4.

Отсутствие проскальзывания инструмента в цанге удобно рассматривать через баланс вращающего и препятствующего моментов. Либо с позиций подвижности в механизме наклонная плоскость, где лепестки цанги скользят (не скользят) по поверхности вала.

Данный подход уместен, так как для этого имеются следующие аргументы и исходные данные:

- механизм п. 4 в отдельности – несамотормозящийся. Однако он элемент составного самотормозящегося механизма;
- в отличии от *разъёмного соединения* рассмотрение здесь ведётся с позиций постоянной подвижности элементов, с чётко выраженной функцией – принудительное самоторможением, которое должно быть аналитически рассчитано и возможно варьироваться от ситуации;
- механизм п. 4 – имеется входное движение под углом к нормали к поверхности (сложение нормали и приводного усилия), наличие подвижности (при смене инструмента) либо отсутствие передачи движения (при работе).

С позиций силового баланса фиксация вала инструмента осуществляется посредством вхождения в область равновесия за счёт увеличения сил нормального взаимодействия в контакте поверхностей *фреза-цанга*. При этом потенциальная сила трения больше движущих сил (реальной силы трения). Это достигается работой двух клиновых механизмов, рассмотренных выше.

Самоторможение для *механизм наклонная плоскость* в условиях «подпора» имеют отдельное исследование и здесь не рассматривается. Итоговая зависимость запаса по самоторможению в данном случае для инструмента (фрезы) имеет вид:

$$\varphi_B^{вр} = \frac{f_B F_2 \sin 90^\circ}{M_{вал}/r_B} = \frac{f_B F_2 r_B}{M_{вал}}, \quad (9)$$

где с учётом формулы (1) получим

$$\varphi_B^{вр} = f_B \frac{M_3}{M_{вал}} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{ц} \operatorname{tg} \alpha_{ц}}{f_{ц} + \operatorname{tg} \alpha_{ц}}. \quad (10)$$

Следует отметить, что в выражении (9) сила F_2 создана на этапе затягивания гайки цангового соединения.

Обсуждение

Данный простейший механизм, – *механизм наклонная плоскость* – выступает непосредственным контактным исполнителем фиксации

инструмента. Можно отметить, что из всех радиусов здесь имеет место наименьший радиус действия силы, – r_B . Соответственно силовой фактор, для обеспечения передачи момента, возрастает.

Для случая передачи цанговым механизмом осевого усилия, – отсутствие смещения (удержание) вала в осевом направлении – формула (9) трансформируется к виду

$$\varphi_B^{oc} = \frac{f_B F_2}{F_{oc}} = f_B \cdot \frac{M_3}{F_{oc} r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{ц} \operatorname{tg} \alpha_{ц}}{f_{ц} + \operatorname{tg} \alpha_{ц}}, \quad (11)$$

где F_{oc} – сила осевого воздействия.

Следует отметить, что в выражении (9) сила F_2 создана на этапе затяжки цангового соединения. Для 2-ого *простейшего механизма* (см. выше), – скоса цанги – это запертая сила, которую он удерживает.

$$\varphi_B = \frac{M_3}{M_{вал}} \frac{r_B}{r_p} \cdot \frac{1 - f_p \operatorname{tg} \alpha_p}{f_p + \operatorname{tg} \alpha_p} \cdot \frac{1 - f_{ц} \operatorname{tg} \alpha_{ц}}{f_{ц} + \operatorname{tg} \alpha_{ц}} \cdot f_B. \quad (12)$$

Заключение

Таким образом, используя метод разложения на *простейшие* рассмотрена механика процесса и получены аналитические зависимости (9), (11) по определению величина момента затяжки гайки цангового механизма для обеспечения фиксации инструмента при передаче вращения и осевого удержания с требуемым запасом по фиксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ozoegwu, C.: Automated Upgraded Generalized Full-Discretization Method: Application to the Stability Study of a Thin-Walled Milling Process / C. Ozoegwu, P. Eberhard // Mechanical Science, Springer, 2021, p. 83-104, ISBN 978-981-15-5711-8
- [2] Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; под общ. ред. А. А. Панова. - М.: Машиностроение, 2004. -784 с.
- [3] Кувшинский, В. В. Фрезерование. М., Машгиз, 1958.
- [4] Панюхин, В. В. Исследование самоторможения механизмов и разработка методов проектирования высокоэффективных зубчатых

- зацеплений с тормозящими профилями : дисс. соиск. учен. степ. канд. техн. наук : спец.: 05.02.02 - Машиноведение и детали машин : 05.02.18 - Теория механизмов и машин / В. В. Панюхин; Владимирский государственный университет (ВлГУ) – Владимир, 1999, 375 с.
- [5] Турпаев, А. И. Самотормозящиеся механизмы. М.: «Машиностроение», 1976, 208 с.
- [6] Вейц, В. Л. Динамика машинных агрегатов, Машиностроение, Ленинград, 1969 г., 367 стр.;
- [7] Вейц, В. Л. Динамика приводов с замкнутыми кинематическими цепями / В. Л. Вейц, И. А. Гидаспов, Г. В. Царев // Мордовский государственный университет, 1991 г., 179 стр.;
- [8] Вейц, В. Л. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронным двигателем, Киев, 88 г., 272 с.
- [9] Вейц, В. Л., Расчет тормозных режимов в приводах с самотормозящейся передачей. Бюллетень Ленинградского политехнического университета, №6, 1958 г.
- [10] Левитский, Н. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука. 1979, 576 с.
- [11] Колчин, Н. И. Механика машин: В 2 т., изд. 3-е перераб. Л.:Машиностроение, 1971, т.2.–456 с.
- [12] Пат. ФРГ № 1040864, МКИ F 06 Н. Zahnradgetriebe / A. Roano (Швейцария). - № 15 777; заявлено 1.03.56; опубл. 9.10.58; НКИ 47 Н 06 – 2 с..
- [13] Детали машин / О. А. Ряховский, А. В. Клыпин – М. : Дрофа, 2002, 282 с. – ISBN 5-7107-5232-0.
- [14] Мюнстер, Н. С. Определение коэффициента полезного действия зубчатых передач // Труды Ташкентского политехнического ин-та. - 1968. - Вып. 30. - с. 82-104.
- [15] Гуковский, М. А. Механика Леонардо да Винчи / М.,Л.: Изд-во АН СССР, 1947, 816 с.
- [16] Amontons, G. De la resistance cause dans les machines //Mem. L'Acad. Roy., 1699.-pp. 206-222
- [17] Coulomb, C. A. Theorie des machines simples //Mem. Math, et Phys. L'Acad. Sci., 1785, vol. 10, pp. 161-331
- [18] Андриенко, П. А. Использование элементов теории графов для структурного анализа механизмов / П. А. Андриенко, А. Н. Евграфов, Д. П. Козликин и др. / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 43-58.
- [19] Побжелко, В. И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов / П. А. Андриенко, А. Н. Евграфов, Д. П. Козликин и др. / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 91-100.

- [20] Суханов, А. А. Клиновая модель трения скольжения / Современное машиностроение: наука и образование 2023: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023, с. 134-146.
- [21] Суханов, А. А. Влияние протектора на трение скольжения / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, с. 164-176.
- [22] Starikov, A. N. Improving the energy efficiency of construction equipment through the development of design methods for self-braking mechanisms / Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of MPCPE 2024, Selected Papers // Springer – Switzerland, p 339-349
- [23] Стариков, А. Н. Механика протектора шин / Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. // Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. - №7. – с. 109 - DOI: 10.26160/2658-6185-2024-7.
- [24] Васильев, А. А. Влияние конструктивного исполнения вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на технологические параметры токарной обработки крупногабаритных валов / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 331-340.
- [25] Гасюк, Д. П. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях / Д. П. Гасюк, В. А. Косова // Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 341-354.
- [26] Арслан, Х. Методика оптимизации зажимных устройств на основе материалов с памятью формы / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 385-396.
- [27] Sukhanov, A. Sliding of the Car on Inclined Plane / Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, p. 48-58, ISBN 978-3-031-48850-4, doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1
- [28] Стариков, А. Н. Механизмы, основанные на взаимодействиях тел по плоскости // Теория механизмов и машин, СПбПУ Петра Великого, 2019. Т. 1. № 1. С. 27-39.

SELF-BRAKING OF THE COLLET MECHANISM

Abstract

The work is devoted to determining the conditions for fixing metal-cutting tools. The analysis is conducted from the standpoint of the theory of self-inhibition of mechanisms. The sequential arrangement of a composite mechanism based on the simplest mechanisms, an inclined plane and a wedge mechanism is considered. Analytical dependences have been obtained to determine the tightening torque of the collet nut for fixing the tool with the required margin for self-braking in both rotation and axial displacement.

Key words: self-braking, inclined plane mechanism, wedge pair.

REFERENCES

- [1] Ozoegwu, C. Automated Upgraded Generalized Full-Discretization Method: Application to the Stability Study of a Thin-Walled Milling Process / C. Ozoegwu, P. Eberhard // Mechanical Science, Springer, 2021, pp. 83-104, ISBN 978-981-15-5711-8
- [2] Metal cutting: a technologist's handbook / A. A. Panov, V. V. Anikin, N. G. Boym et al.; under the general editorship of A. A. Panov. - M.: Mashinostroenie, 2004. -784 p.
- [3] Kuvshinsky, V. V. Milling. Moscow, Mashgiz, 1958.
- [4] Panyukhin, V. V. Investigation of self-braking mechanisms and development of design methods for highly efficient gear gears with braking profiles: diss. Thank you. learned. step. Candidate of Technical Sciences: spec.: 02/05/02 - Machine science and machine parts: 02/05/18 - Theory of mechanisms and machines / V. V. Panyukhin ; Vladimir State University (VISU) – Vladimir, 1999, 375 p.
- [5] Turpaev, A. I. Self-braking mechanisms. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 208 p.
- [6] Weitz, V. L. Dynamics of machine units, Mechanical Engineering, Leningrad, 1969, 367 p.;
- [7] Weitz, V. L. Dynamics of drives with closed kinematic circuits / V. L. Weitz, I. A. Gidaspov, G. V. Tsarev // Mordovian State University, 1991, 179 p.;
- [8] Weitz, V. L. Dynamics of a controlled electro-mechanical drive with an asynchronous motor, Kiev, 88, 272 p.
- [9] Weitz, V. L. Calculation of braking modes in self-braking gear drives. Bulletin of the Leningrad Polytechnic University, No. 6, 1958

- [10] Levitsky, N. I. Theory of mechanisms and machines. Moscow: Nauka. 1979, 576 p.
- [11] Kolchin, N. I. Mechanics of machines: In 2 volumes, ed. 3rd edition. L.: Mashinostroenie, 1971, vol. 2.-456 p.
- [12] German Patent No. 1040864, MCI F 06 H. Zahnradgetriebe / A. Roano (Switzerland). - No. 15 777; announced 1.03.56; published 9.10.58; NKI 47 H 06 – 2 p.
- [13] Machine parts / O. A. Ryakhovsky, A. V. Klypin – M.: Bustard, 2002, 282 p. – ISBN 5-7107-5232-0.
- [14] Munster, N. S. Determination of the efficiency of gears // Proceedings of the Tashkent Polytechnic Institute. - 1968. - Issue 30. - pp. 82-104.
- [15] Gukovsky, M. A. The mechanics of Leonardo da Vinci / M., L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947, 816 p.
- [16] Amontons, G. De la resistance cause dans les machines //Mem. L'Acad. Roy., 1699.-pp. 206-222
- [17] Coulomb, C. A. Theorie des machines simples //Mem. Math, et Phys. L'Acad. Sci., 1785, vol. 10, pp. 161-331
- [18] Andrienko, P. A. The use of graph theory elements for structural analysis of mechanisms / P. A. Andrienko, A. N. Evgrafov, D. P. Kozlikin et al. / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 43-58.
- [19] Pobzhelko, V. I. Universal algorithm for the synthesis of structural schemes of complex single- and multi-movable lever mechanisms / P. A. Andrienko, A. N. Evgrafov, D. P. Kozlikin et al. / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 91-100.
- [20] Sukhanov, A. A. Wedge model of sliding friction / Modern mechanical engineering: science and education 2023: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2023, pp. 134-146.
- [21] Sukhanov, A. A. The effect of a tread on sliding friction / Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2024, pp. 164-176.
- [22] Starikov, A. N. Improving the energy efficiency of construction equipment through the development of design methods for self-braking mechanisms / Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of MPCPE 2024, Selected Papers // Springer – Switzerland, p 339-349
- [23] Starikov, A. N. Mechanics of tire tread / A. N. Starikov // Mechanics and mechanical engineering. Science and Practice: Proceedings of the international scientific and practical conference. - Saint Petersburg: SIC MS, 2024. - No. 7. – p. 109 - DOI: 10.26160/2658-6185-2024-7.

- [24] Vasiliev, A. A. The influence of the structural design of the GSO liner with an incomplete girth angle on the technological parameters of turning large-sized shafts / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 331-340.
- [25] Gasyuk, D. P. The problem of choosing the optimal variant of the technological process of manufacturing machine-building products in modern conditions / D. P. Gasyuk, V. A. Kosova // Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 341-354.
- [26] Arslan, H. Methodology for optimizing clamping devices based on shape memory materials / H. Arslan, M. T. Korotkov / Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 385-396.
- [27] Sukhanov, A. A. Sliding of the Car on an Inclined Plane / Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, pp. 48-58, ISBN 978-3-031-48850-4, doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1
- [28] Starikov, A. N. Mechanisms based on the interaction of bodies along the plane // Theory of Mechanisms and Machines, Peter the Great St. Petersburg State Pedagogical University, 2019. Vol. 1. No. 1. pp. 27-39.