

УДК 531.8

## Динамический анализ захватного устройства робота-манипулятора

**Е. В. Опарина**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Опарина Е. В. Динамический анализ захватного устройства робота-манипулятора // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 172–179. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-172-179

### Аннотация

**Цель:** определение и анализ основных передаточных характеристик типовой схемы рычажного механизма захватного устройства робота-манипулятора. **Методы:** проведен кинематический анализ аналитическим и графоаналитическим методами, а также динамический анализ с использованием принципа возможных скоростей в статическом режиме, составлено общее уравнение динамики механизма в режиме вращения вокруг главной центральной оси инерции. **Результаты:** установлены зависимости передаточных характеристик механизма от его геометрических параметров и зависимость допустимого угла давления в поступательной кинематической паре механизма от геометрических параметров схемы механизма. Получена зависимость усилия на зажиме захватного устройства от силы на штоке гидроцилиндра. **Практическая значимость:** результаты кинематического анализа могут быть применены для синтеза более совершенного механизма по условию допустимых углов давления, а также для более углубленного расчета параметров взаимодействия захватного устройства с объектом манипулирования. Результаты силового расчета применимы для расчета параметров силового гидроцилиндра, отвечающего заданной грузоподъемности робота.

**Ключевые слова:** манипуляционный робот, захватное устройство, кинематический анализ, схват, динамический анализ, силовое передаточное отношение, кинематическое передаточное отношение

### Устройство промышленных роботов

Роботизация прочно заняла приоритетное место в национальном технологическом развитии. Роботы широко применяются во всех отраслях, включая машиностроение, фармацевтическую, аграрную и пищевую промышленность, складскую логистику, энергетику, нефтегазовый сектор и пр. В связи с этим разработка новых методов расчета, а также совершенствование уже применяющихся конструкций элементов робототехнических систем остаются актуальными задачами.

Промышленные роботы (ПР) относятся к классу манипуляционных робототехнических систем, которые применяются для авто-

матизации технологических процессов [1]. ПР оснащаются захватными устройствами для захватывания и удержания объектов манипулирования.

В качестве силовых приводов механических захватных устройств применяются гидравлические, пневматические цилиндры, развивающие на штоке усилие  $\bar{F}$ . Одними из основных характеристик конструкции захватного устройства являются силовое передаточное отношение  $k_F$  и кинематическое передаточное отношение  $k_V$  [2].

По принципу действия захватные устройства (ЗУ) подразделяются на механические, электромагнитные, вакуумные, удерживающие

при помощи сил электростатического притяжения, адгезии, с липкими накладками и др.

По способу удержания объекта хватные устройства подразделяются на схватывающие, поддерживающие и удерживающие. Схватывающие хватные устройства удерживают объект при помощи запирающих усилий и сил трения рабочих органов (губок, пальцев) [1–3].

На рис. 1 представлена принципиальная схема схватывающего хватного устройства. Хватное устройство рычажного типа состоит из силового гидроцилиндра (1), который через тягу (2) передает усилие одновременно на два скользящих элемента (3). Скользящие элементы (3) перемещаются по направляющим (4), жестко связанным с губками захвата (5).

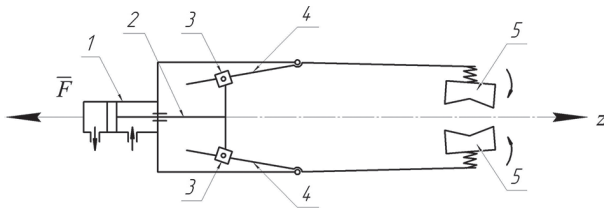


Рис. 1. Принципиальная схема механического хвата робота-манипулятора

### Кинематический анализ схемы хватного устройства робота-манипулятора

Кинематическая схема рычажного механизма ЗУ представлена на рис. 2. Под действием усилия, развиваемого на штоке гидроцилиндра, тяга двигается поступательно со скоростью  $\bar{V}_E$ . Поступательное движение от тяги передается симметричным кулисным камням  $C$ ,  $C_1$ , которые, участвуя в сложном движении, сообщают вращательные движения звеньям  $COB$  и  $C_1O_1B_1$  соответственно. Звенья  $COB$  и  $C_1O_1B_1$  реализуют хватное движение [4].

Найдем зависимости скоростей точек  $C$ ,  $B$  от скорости на штоке гидроцилиндра  $\bar{V}_E$  (рис. 2). Рассмотрим цикл захвата детали. Механизм ЗУ манипулятора симметричен относительно оси  $Ez$ , кинематический анализ проведем только для одной части механизма [5].

Кулисный камень  $C$  двигается в относительном движении по направляющей  $CO$  со скоростью  $\bar{V}_{Cr}$ , в переносном движении — вместе со звеном  $COB$  участвует во вращательном движении вокруг точки  $O$  со скоростью  $\bar{V}_{Ce}$ . Абсолютную скорость кулисного камня  $C$  найдем

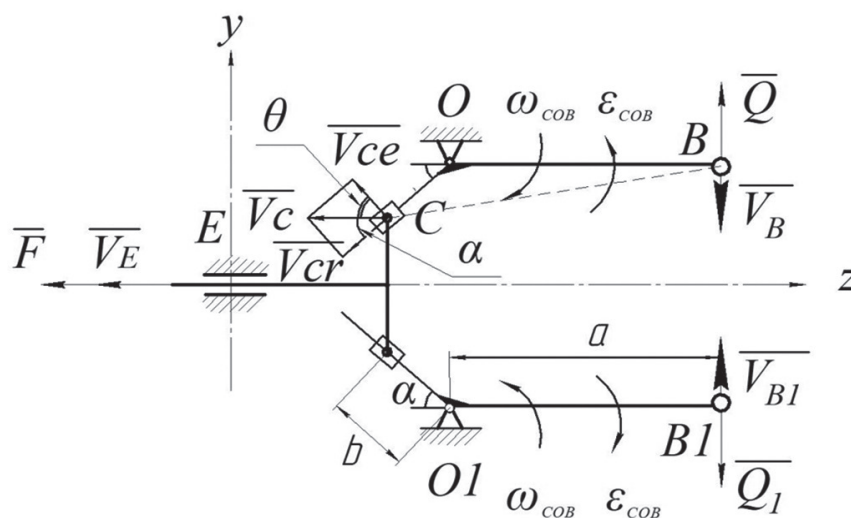


Рис. 2. Кинематическая схема ЗУ робота-манипулятора

как геометрическую сумму относительной и переносной скоростей:

$$\vec{V}_C = \vec{V}_{Ce} + \vec{V}_{Cr}. \quad (1)$$

Спроецируем выражение (1) на ось  $Ey$ :

$$0 = -V_{Cr} \sin(\alpha) + V_{Ce} \cos(\alpha) \quad (2)$$

и на ось  $Ez$ :

$$V_C = V_{Ce} \sin(\alpha) + V_{Cr} \cos(\alpha). \quad (3)$$

Выразим относительную и переносную скорости кулисного камня  $C$  через абсолютную скорость  $\vec{V}_C$ . Абсолютная скорость  $\vec{V}_C$  равна скорости точки  $E$  штока гидроцилиндра  $\vec{V}_C = \vec{V}_E$  (рис. 2). Совместно решая (1)–(3), получим переносную скорость:

$$V_{Ce} = V_{Cr} \operatorname{tg}(\alpha) = V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

и относительную скорость:

$$V_{Cr} = V_C \cdot \cos(\alpha) = V_E \cdot \cos(\alpha).$$

Найдем угловую скорость звена  $COB$ :

$$\omega_{COB} = \frac{V_{Ce}}{b} = \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{b}.$$

Скорость точки  $B$  равна:

$$V_B = \omega_{COB} \cdot a = \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b}.$$

Кинематическое передаточное отношение захватного устройства:

$$k_v = \frac{V_E}{V_B} = \frac{b}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}, \quad (4)$$

где  $a$  — расстояние от стойки  $O$  до линии действия силы сжатия детали захватным устройством;  $b$  — расстояние от стойки  $O$  до кулисного камня  $C$  в текущем положении;  $\alpha$  — угол между участками  $CO$  и  $OB$  звена  $COB$  (рис. 2).

Проиллюстрируем кинематику ЗУ манипулятора планом скоростей и ускорений для

положения, представленного на рис. 2. Длины звеньев, угловая скорость, угловое ускорение звена  $COB$  и скорость штока гидроцилиндра  $\vec{V}_E$  считаются заданными [2–4].

Скорость кулисного камня  $C$  найдем согласно векторному выражению (1) с учетом того, что его абсолютная скорость направлена вдоль оси  $Ez$ .

Точка  $B$  имеет вращательную скорость относительно центра  $O$ , вместе с этим скорость точки  $B$  можно найти как векторную сумму абсолютной скорости кулисного камня  $\vec{V}_C$  и вращательной скорости точки  $B$  по отношению к кулисному камню  $C$ :

$$\begin{cases} \vec{V}_B = \vec{V}_O + \vec{V}_{BO} \\ \vec{V}_B = \vec{V}_C + \vec{V}_{BC} \end{cases}. \quad (5)$$

План ускорений механизма ЗУ строится через составление и графическое решение следующих систем векторных уравнений:

$$\begin{cases} \vec{a}_{C1} = \vec{a}_O + \vec{a}_{C1O}^n + \vec{a}_{C1O}^r, \\ \vec{a}_C = \vec{a}_{C1} + \vec{a}_C^{kop} + \vec{a}_{C34}^r, \\ \vec{a}_B = \vec{a}_O + \vec{a}_{BO}^n + \vec{a}_{BO}^r, \\ \vec{a}_B = \vec{a}_C + \vec{a}_{BC}^n + \vec{a}_{BC}^r \end{cases}, \quad (6)$$

где  $C1$  — точка на направляющей (4) захватного устройства, совпадающая в данный момент с кулисным камнем;  $\vec{a}_{C34}^r$  — относительное ускорение кулисного камня  $C$  по отношению к тяге (4);  $\vec{a}_{C34}^{kop}$  — ускорение Кориолиса (рис. 2 и 3).

Планы скоростей и ускорений ЗУ манипулятора представлены на рис. 3.

### Силовой расчет ЗУ робота-манипулятора в статическом режиме

Проведем силовой расчет по определению усилий  $\vec{Q}$  и  $\vec{Q}_1$  на зажимах ЗУ манипулятора в случае статического удержания детали. Губки  $B$  и  $B_1$  приняты за материальные точки.

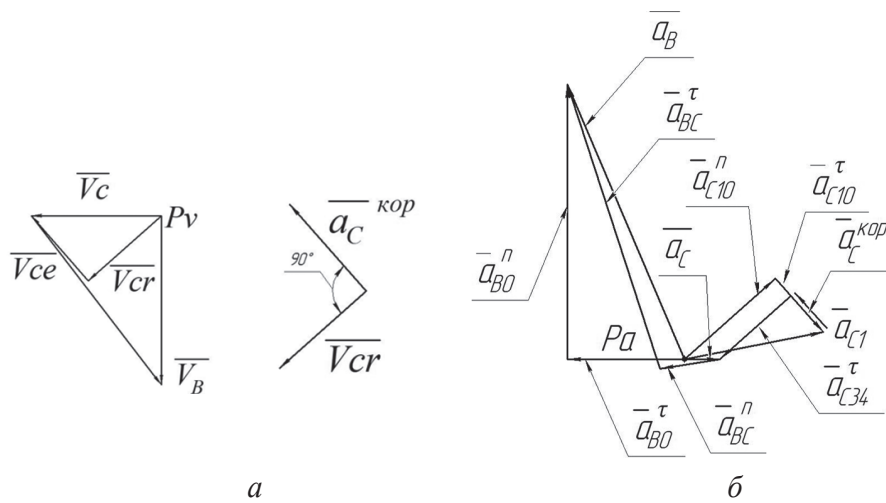


Рис. 3: а — план скоростей, б — план ускорений захватного устройства

Используем принцип возможных скоростей и составим уравнение в форме суммы мощностей:

$$\sum \bar{P}_i \cdot \bar{V}_i = 0 \quad (7)$$

или

$$\sum P_i \cdot V_i \cdot \cos(\bar{P}_i, \bar{V}_i) = 0.$$

На рис. 2 показаны возможные скорости и активные силы, действующие в механизме.

Силы тяжести не входят в уравнение суммы мощностей, поскольку действуют перпендикулярно направлению возможных скоростей [2–4].

Уравнение мощностей запишется так:

$$F \cdot V_E - Q \cdot V_B - Q_1 \cdot V_{B1} = 0, \quad (8)$$

где  $\bar{F}$  — усилие, развиваемое на штоке гидроцилиндра;  $Q, Q_1$  — силы сжатия детали губками  $B$  и  $B_1$  захватного устройства.

$$F \cdot V_E - Q \cdot \frac{V_E \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b} - Q_1 \cdot \frac{V_E \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b} = 0,$$

$$F = 2 \cdot Q \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b}.$$

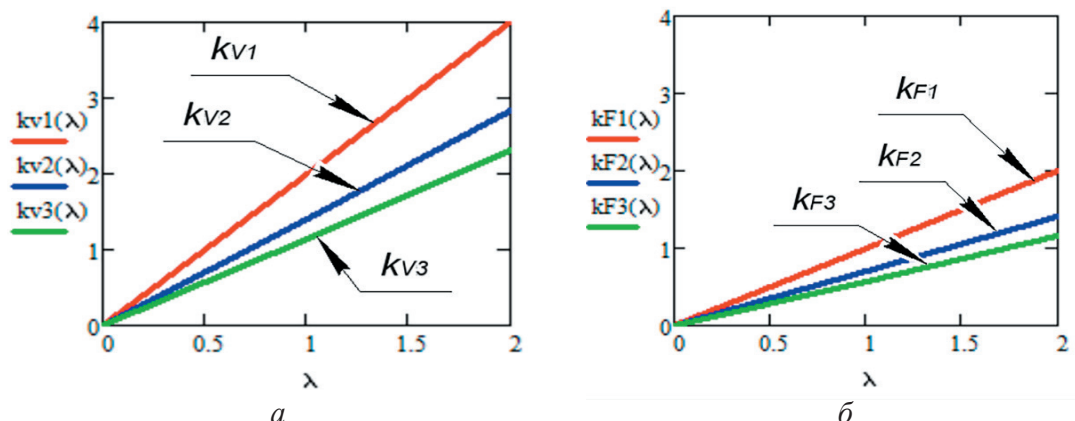
Силовое передаточное отношение ЗУ робота-манипулятора:

$$k_F = \frac{Q}{F} = \frac{b}{2 \cdot a \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}, \quad (9)$$

где  $a$  — расстояние от стойки  $O$  до линии действия силы сжатия детали захватным устройством;  $b$  — расстояние от стойки  $O$  до кулисного камня  $C$  в текущем положении (рис. 2).

Зависимости кинематического передаточного отношения  $k_V$  и силового передаточного отношения  $k_F$  механизма схвата от соотношения длин участков звена  $COB$  ( $\lambda = CO/OB = b/a = 0,1 \dots 2$ ) приведены на рис. 4. Зависимости получены при фиксированных углах  $\alpha$  между участками  $CO$  и  $OB$ : передаточные отношения  $k_{V1}, k_{F1}$  — при угле  $\alpha = 30^\circ$ , передаточные отношения  $k_{V2}, k_{F2}$  — при угле  $\alpha = 45^\circ$ , передаточные отношения  $k_{V3}, k_{F3}$  — при угле  $\alpha = 60^\circ$ .

Из рис. 4 следует, что при увеличении соотношения длин  $\lambda = b/a = 0,1 \dots 1,5 \dots 2$  передаточные коэффициенты скорости и силы возрастают. Длины звеньев могут лимитироваться по условиям их инерционности и реализации конкретных задач в ограниченном



**Рис. 4.** Зависимость передаточных отношений от соотношения длин звеньев захватного устройства  $\lambda = b/a$ :  $a$  — кинематического,  $b$  — силового

пространстве, а также по силовым характеристикам привода. При этом угол  $\alpha$ , определяющий наклон направляющей кулисного камня (4) к горизонтали, является обратным для угла давления  $\theta = 90^\circ - \alpha$  в поступательной кинематической паре  $C$ .

С уменьшением угла  $\alpha$  возрастает угол давления  $\theta$ , что приводит к ухудшению условий работы кинематической пары «кулиса — кулисный камень». Наилучшие условия движения кулисного камня из рассмотренных при расчете зависимостей кинематических и силовых передаточных отношений будут при  $\alpha = 60^\circ$  (рис. 4) [2–4].

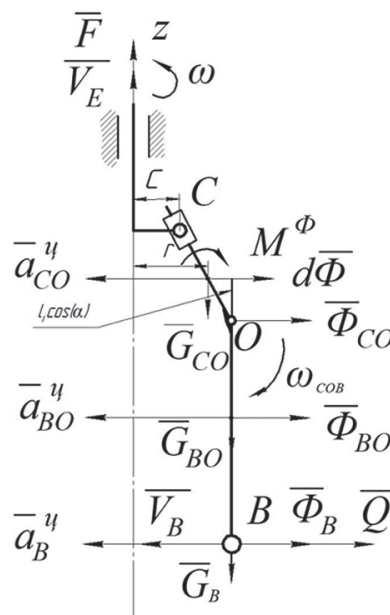
#### Силовой расчет схемы схвата роботоманипулятора в динамическом режиме

Определим зависимость усилий на зажимах захватного устройства  $\bar{Q}$ ,  $\bar{Q}_1$ , вращающегося с постоянной угловой скоростью вокруг главной центральной оси инерции  $Ez$ , от силы на штоке гидроцилиндра  $\bar{F}$  и угловой скорости  $\omega$ . Применим принцип Даламбера и составим общее уравнение динамики. Так как схват представляет собой симметричный механизм, рассмотрим только одну его часть (рис. 5).

Схват вращается с постоянной угловой скоростью, на его звенья действуют только центробежные силы инерции. Центробежная сила инерции, приложенная в точке  $B$ :

$$\bar{\Phi}_B = -m_B \cdot \bar{a}_B^y.$$

Равнодействующая центробежных сил инерции участка  $BO$ , приложенная к его центру масс:



**Рис. 5.** Распределение внешних сил и сил инерции, действующих на механизм ЗУ

$$\bar{\Phi}_{BO} = -m_{BO} \cdot \bar{a}_{BO}^u,$$

Центробежную силу инерции участка  $CO$  приведем к точке  $O$ . В результате получим главный вектор сил инерции  $\bar{\Phi}_{CO}$  и главный момент  $\bar{M}^\Phi$  сил инерции относительно центра  $O$  (10), где  $l_i \cos(\alpha)$  — плечо силы инерции участка  $CO$  длиной  $l_i$ ,  $d\Phi$  — элементарная центробежная сила инерции (рис. 6) [6].

$$\bar{\Phi}_{CO} = -m_{CO} \cdot \bar{a}_{CO}^u,$$

$$M^\Phi = \int_0^b l_i \cos(\alpha) \cdot d\Phi \quad (10)$$

$$d\Phi = a_{CO}^u \cdot dm_{CO} = \omega^2 r \cdot dm_{CO},$$

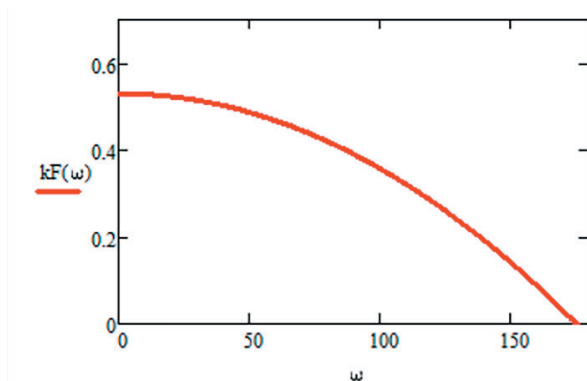
$$dm_{CO} = \gamma \cdot dl_i, \quad (11)$$

где  $r$  — радиус траектории, по которой движется элементарный участок стержня  $dl_i$ ;  $dm_{CO}$  — масса элементарного участка стержня  $dl_i$ ;  $\gamma$  — погонная масса стержня.

В итоге момент силы инерции  $M^\Phi$  относительно центра приведения  $O$  запишется как:

$$\begin{aligned} M^\Phi &= \int_0^b l_i \cos(\alpha) \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \gamma \cdot dl_i = \\ &= \omega^2 \cdot m_{CO} \cdot \cos(\alpha) \cdot b \cdot \left( \frac{c}{2} + \frac{b \cdot \sin(\alpha)}{6} \right), \quad (12) \end{aligned}$$

где  $r = c + b \sin(\alpha) - l_i \sin(\alpha)$ .



**Рис. 6.** Зависимость силового передаточного отношения захватного устройства от угловой скорости вращения

Общее уравнение динамики запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{F}{2} \cdot V_E + M^\Phi \cdot \omega_{BOC} - \Phi_1 \cdot \frac{a}{2} \cdot \omega_{BOC} - \\ - (\Phi_B + Q) \cdot a \cdot \omega_{BOC} - G_{CO} \cdot \frac{b}{2} \sin(\alpha) \cdot \omega_{BOC} = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\frac{F}{2}$  — модуль силы на штоке гидроцилиндра, отнесенный к одной половине механизма захватного устройства.

Зависимость усилия на зажиме захватного устройства  $\bar{Q}$  от силы на штоке гидроцилиндра  $\bar{F}$  и угловой скорости  $\omega$ , полученная при следующих исходных данных захватного устройства:  $a = 8$  см,  $b = 6$  см,  $c = 4$  см,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $m_{BO} = 0,2$  кг,  $m_{CO} = 0,4$  кг,  $m_B = 0,18$  кг, запишется в виде:

$$Q = 0,53F - 1,73 \cdot \omega^2 - 1,04. \quad (14)$$

Силовое передаточное отношение в динамическом режиме:

$$k_F = \frac{Q}{F} = \frac{0,53F - 1,73 \cdot \omega^2 - 1,04}{F}. \quad (15)$$

## Выводы

1. В статье приведен кинематический и силовой расчет механизма захватного устройства робота-манипулятора кулисного типа. Получены кинематическое передаточное отношение и силовое передаточное отношение механизма захватного устройства в статическом режиме (в режиме удержания детали).

2. Установлено, что для данной конструкции захватного устройства увеличение угла наклона кулисы  $\alpha$  исполнительного звена захвата приводит к уменьшению угла давления, что делает движение поступательной кинематической пары «кулиса — кулисный камень» более плавным и надежным. При этом кинематическое и силовое

передаточные отношения незначительно снижаются.

3. Проведен силовой расчет захватного устройства в динамическом режиме работы — в режиме удержания детали и вращения вместе с ней вокруг главной центральной оси инерции. Получена зависимость силового передаточного отношения захватного устройства манипулятора от угловой скорости в динамическом режиме.

4. Показано, что необходимое усилие на штоке гидроцилиндра для удержания детали при вращении захватного устройства существенно зависит от центробежной силы инерции, которая, в свою очередь, зависит от квадрата угловой скорости ЗУ. При некотором значении угловой скорости силовое передаточное отношение может оказаться равным нулю.

#### Список источников:

1. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2016. 311 с.

2. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 1: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 300 с.

3. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 366 с.

4. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 3: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 380 с.

5. Челпанов И.Б. Устройство промышленных роботов: учеб. для техникумов и колледжей. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2001. 203 с.

6. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: учеб. и практикум для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2025. 432 с.

Дата поступления: 26.11.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

#### Контактная информация:

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук., доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»;  
Oparina-ekaterina@inbox.ru

## Dynamic analysis of a robotic manipulator gripper

### E. V. Oparina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Russia, 9 Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 190031

**For citation:** *Oparina E. V. Dynamic Analysis of a Robotic Manipulator Gripper // Proceedings of Petersburg Transport University. St. Petersburg: PGUPS, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 172–179. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-172-179. (In Russian)*

#### Abstract

**Objective:** to identify and analyze the main transmission characteristics of a typical linkage mechanism used in the gripper of a robotic manipulator. **Methods:** the mechanism was investigated kinematically

through both analytical and combined graphical-analytical analysis. Its dynamic behaviour was also evaluated under static conditions based on the principle of virtual velocities. In addition, a general equation of the mechanism's dynamics was derived for motion involving rotation around the principal central axis of inertia. **Results:** relationships between the mechanism's transmission characteristics and its geometric parameters have been determined. The dependence of the permissible pressure angle in the mechanism's translational kinematic pair on the geometric parameters of the mechanism's configuration has been established. A functional relationship has also been obtained between the gripping force of the gripper and the force exerted on the hydraulic cylinder rod. **Practical significance:** the results of the kinematic analysis may be applied to synthesize a more advanced mechanism based on the criterion of permissible pressure angles. The findings can likewise support a more precise evaluation of the interaction between the gripper and the object being manipulated. The results of the force calculation are applicable to determining the parameters of the hydraulic power cylinder required to satisfy the robot's specified load-carrying capacity.

**Keywords:** robotic manipulator, gripper, kinematic analysis, grip, dynamic analysis, force transmission ratio, kinematic transmission ratio

## References

1. Kozyrev Yu.G. Zakhvatnye ustrojstva i instrumenty promyshlennykh robotov: ucheb. posobie. M.: KNORUS, 2016. 311 s. (In Russian)

2. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov / E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 300 s. (In Russian)

3. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov / E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 366 s. (In Russian)

4. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov /

E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 380 s. (In Russian)

5. Chelpanov I.B. Ustrojstvo promyshlennykh robotov: ucheb. dlya tekhnikumov i kolledzhej, 2-e izd., pererab. i dop. SPb.: Politehnika, 2001. 203 s. (In Russian)

6. Timofeev G.A. Teoriya mekhanizmov i mashin: ucheb. i praktikum dlya vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Yurajt, 2025. 432 s. (In Russian)

Received: 26.11.2025

Accepted: 19.01.2026

## Author's information:

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Mechanics and Strength of Materials and Structures”, Associate Professor of the Department “Land Transport and Technological Complexes”;  
Oparina-ekaterina@inbox.ru