



UDC 629.7.615

## MODELING THE INTERACTION OF A GRIPPING DEVICE WITH THE MANIPULATED OBJECT

### МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ З ОБ'ЄКТОМ МАНІПУЛЮВАННЯ

Ashcherkova N.S. / Ащепкова Н.С.

с.т.с., ас.проф. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-1870-1062

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Gagarin Ave. 72, 49010

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, пр. Гагаріна 72, 49010

**Анотація.** Представлено результати математичного моделювання взаємодії захватних пристроїв з об'єктом маніпулювання та оснащенням. взаємодії захватних пристроїв з об'єктом маніпулювання та оснащенням. Досліджена залежність силового передатного відношення  $K$  схвату і кінематичного передатного відношення  $K\delta$  схвату від геометричних характеристик ланок кінематичної схеми передавального механізму. За результатами моделювання можна вибрати кількість точок контакту, конструкцію контактної поверхні та визначити сили, необхідні для утримання заготівлі спеціалізованим схватом маніпулятора. Наведено розрахункові приклади, які дозволяють обрати конструкцію захватного пристрою. та визначити співвідношення між силою стиснення деталі  $F$  і зусиллям приводу на вхідній ланці  $P$ .

**Ключові слова:** маніпулятор, захватний пристрій, схват, об'єкт маніпулювання.

#### Вступ.

Вибір захватного пристрою (ЗП) маніпулятора залежить від властивостей деталі, способу утримування та базування деталі або зумовлений обмеженнями на застосування того чи іншого типу ЗП.

Кількість точок контакту між пальцями захватного пристрою та об'єкту визначає ступінь фіксації. Для плоских паралельних поверхонь мінімально необхідно дві точки контакту. Наявність трьох точок контакту забезпечує самоцентрування об'єктів циліндричної або сферичної форми. Багатоточкові (адаптивні) захватні пристрої використовуються для об'єктів складної геометрії з метою рівномірного розподілу тиску.

Зі збільшенням маси деталі зростає необхідність у більшій кількості точок дотику для зменшення питомого тиску на поверхню об'єкта та запобігання його деформації. Для великогабаритних об'єктів точки дотику мають бути максимально рознесені, щоб протидіяти перекидаючим моментам та інерційним навантаженням під час руху маніпулятора.



Для оптимізації захвату застосовують спеціальні гумові накладки (фрикційні елементи), які призначені збільшити коефіцієнт тертя та дозволяють надійно утримувати об'єкт при меншому зусиллі стискання пальців.

Моделювання взаємодії захватного пристрою (ЗП) з об'єктом маніпулювання є ключовим етапом проектування робототехнічних систем.

### **1. Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

При створенні нових конструкцій ЗП маніпуляторів застосовуються автоматизовані методи розрахунку кінематичної схеми, аналізу контактних зусиль та моделюванню процесів захоплення та утримання деталі.

В статті [1] запропоновано надійний та ефективний механізм захоплення, утримання та переміщення. Як ключовий елемент керування пропонується пневматична система, що поєднує високу швидкість реакції, енергоефективність та здатність генерувати значні сили для утримання вантажів.

У статті [2] представлено результати розробки спеціалізованого ЗП. На основі розрахунків за теорією фон Мізеса за допомогою програмного забезпечення AutoCAD спроектовані 2D-компоненти захватного пристрою. Моделювання у 3D-компонентів та складання ЗП здійснено за допомогою програми Autodesk Inventor на основі методу скінченних елементів (МСЕ). З результатів моделювання руху виявлено, що захоплювач може відкриватися, затискатися та обертатися, а за результатами програмного забезпечення FEM коефіцієнт безпеки становить  $= 3,58 > 3,0$ . Результати дослідження доводять доцільність запропонованого методу розрахунку та моделювання ЗП маніпулятора.

Метою роботи [3] є підвищення точності, надійності та гнучкості функціонування інтелектуального захвату шляхом інтеграції методів Sensor Fusion та Neuro-PID регулювання. У процесі дослідження було використано методи математичного моделювання, обробки сенсорної інформації та чисельного аналізу похибок на основі даних з експериментів. Розроблена модель враховує симетрію прикладених зусиль та забезпечує стабільне регулювання сили захоплення, про що свідчать результати експериментів із контролю



похибки асиметрії та керуючого сигналу.

У дослідженні [4] розроблено систему керування ЗП маніпулятора з двома режимами: режимом жестів та режимом Інтернету речей. Використовуваний мікроконтролер – Arduino Mega 2560 з датчиком керування гнучкістю та блоком вимірювання інерції MPU 6050 в режимі жестів та режимі керування Інтернетом речей із середньою похибкою часу за 5 рухів 2,08%. Загальні результати тестування маніпулятором-захватом робота можна керувати за допомогою режиму жестів та режиму Інтернету речей.

Метою дослідження [5] є створення методології підвищення точності позиціонування промислового робота та мінімізації вібрації захоплення робота шляхом застосування машинного навчання на основі розробленої математичної моделі оцінки похибки позиціонування. Розглянуто дві складові точності позиціонування: геометричні та кінематичні похибки та пружні статичні деформації. Проаналізовано динамічну похибку в частковій системі руху ланок маніпулятора робота. Рівняння часткових рухів отримано з диференціального рівняння руху Лагранжа II роду.

При виконанні технологічних операцій у небезпечних для людини умовах система дистанційного керування має враховувати та компенсувати можливі похибки орієнтації та ковзання об'єкту. У статті [6] представлено модульну систему телеоперацій для забезпечення як зворотного зв'язку щодо сили, так і візуального зворотного зв'язку для покращення обізнаності оператора під час багатоконтактних маніпуляцій роботизованого обладнання. Для перевірки запропонованої системи проводяться експерименти з ROS2, колаборативним роботом UR10e, захоплювачем Robotiq 2F-85, тензодатчиками, камерою Intel Realsense та різноманітним набором об'єктів. Результати показують, що система покращує процеси телеоперацій та полегшує захоплення та позиціонування, забезпечуючи безпечне розміщення та відпускання захоплених об'єктів.

У роботі [7] представлено результати розрахунку двох схем захоплення при перевантаженні твердих радіоактивних відходів тепловиділяючих елементів. Визначено необхідні зусилля приводу ЗП маніпулятора, необхідні зусилля



захоплення деталей, проведено статичний аналіз плоских моделей, побудованих 3D-моделей та розрахунків на міцність та жорсткість.

Маневр захоплення рухливого об'єкту є складним, оскільки захоплений об'єкт може прослизати між пальцями ЗП. Для запобігання прослизанню потрібно належним чином відрегулювати силу захоплення, щоб забезпечити обертальне ковзання, одночасно уникаючи поступального ковзання. У статті [8] представлено сенсорний ЗП з урахуванням ковзання. Захоплювач має швидке замкнуте керування низьким рівнем сили та оснащений датчиками, здатними незалежно вимірювати контактні сили та швидкості ковзання. Запропонована система керування може швидко оцінювати важливі властивості об'єкта під час захоплення, використовуючи лише датчики в руці, не покладаючись на попередню інформацію про об'єкт. Розглянуто чотири різні контролери ковзання: гравітаційне відстеження траєкторії як для обертального, так і для лінійного ковзання, шарнірний контролер, який підтримує орієнтацію об'єкта під час обертання захоплювача, та контролер запобігання ковзанню. Наведені результати експериментів доводять доцільність впровадження сенсорного ЗП для маніпулювання об'єктами з плоскими поверхнями.

Дослідження [9] має подвійну мету. По-перше, вдосконалити алгоритми керування, щоб уникнути як обертального, так і лінійного ковзання. Для цього запропоновано нову модель ковзного руху, яка призводить до якомога меншої сили захоплення крихких та деформованих об'єктів. По-друге, у статті [9] використовується модель руху для створення нового алгоритму контрольованого обертального ковзання, що дозволяє виконувати складні маніпуляції. Для впровадження запропонованих методів використано сенсорний ЗП. Шестиосьовий датчик сили/тактильний датчик забезпечує вимірювання контактної сили та крутного моменту, а також орієнтацію об'єкта відносно захоплювача. Представлені результати експериментів на маніпуляторі Kuka iiwa показують, що запропоновані моделі та алгоритми керування ефективно запобігають прослизанню та забезпечують контрольований ковзний рух.

Кількість рухливих елементів (пальців) обумовлює силу затискання та



сферу застосування ЗП. Двопальцеві ЗП потребують значних зусиль стискання для створення достатньої сили тертя. У статті [10] запропоновано захват з одним ступенем свободи та важелем. Вхідним рушійним елементом є важільний механізм, похідний від механізму Сарруса, який пом'якшує вплив інерції двигуна приводу захвата на швидкість реакції робота.

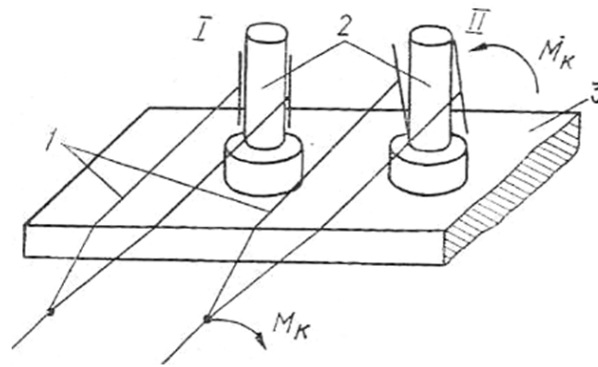
Трипальцеві та багатопальцеві ЗП дозволяють знизити зусилля на кожен окремий палець. Більша кількість пальців дозволяє реалізувати «геометричне замикання» (охоплення), де утримання відбувається не лише за рахунок тертя, а й через неможливість виходу об'єкта з замкненого контуру пальців. Це критично для важких об'єктів або при високих прискореннях. У статті [10] розглядається використання 4-пальцевого ЗП, щоб робот міг захоплювати широкий спектр об'єктів різних форм і розмірів. Модель захоплення об'єкту побудовано з урахуванням тривимірної евклідової відстані між точкою захоплення та ціллю, напрямку захоплення та похибок орієнтації об'єкту. Представлені результати моделювання фреймворк Rovo-gum підтверджені експериментальними даними.

Аналіз літератури доводить, що дослідження взаємодії захватного пристрою з об'єктом є актуальною науково-прикладною задачею.

## **2.Методи дослідження взаємодії захватного пристрою з об'єктом.**

Процеси взаємодії всіх видів захватних пристроїв (ЗП) з об'єктом та оснащенням мають одну важливу особливість, що полягає в необхідності компенсації неточностей їхнього взаємного положення.

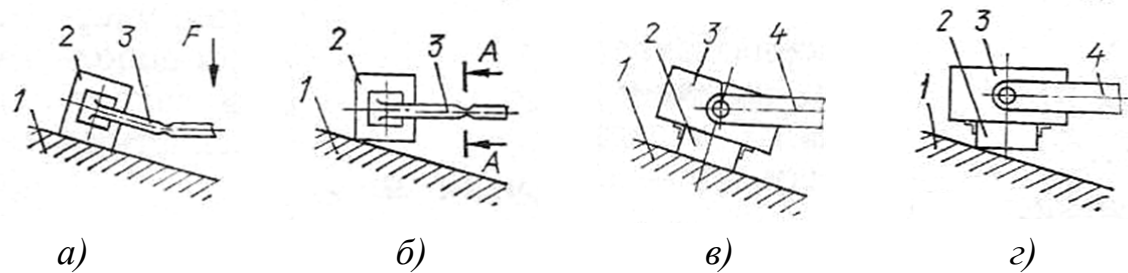
У разі ідеального взаємного положення об'єкта 2 і захватного пристрою 1 при захопленні об'єкт відчуває тільки зусилля затиску (рис. 1, поз. I) [12]. Однак, в реальних умовах через неточність виконання переносних регіональних і орієнтуючих рухів мають місце похибки розташування об'єкта щодо затискних елементів (губок) захватного пристрою, в результаті чого можуть виникнути небезпечні навантаження (зокрема, момент  $M_k$ ), що сприймаються кінематичним ланцюгом захватний пристрій 1 - об'єкт 2 – оснащення 3 (рис. 1. поз. II) [12].



**Рисунок 1 – Схема взаємного розташування губок захватного пристрою та об'єкту маніпулювання.**

Джерело: [12]

З метою запобігання цього небажаного явища при взаємодії захватного пристрою з об'єктом довільної форми, закріпленим у нерухомому оснащенні, необхідно забезпечити податливість у ланцюзі по шести напрямках: вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей і навколо них. Число напрямків може бути зменшено завдяки особливостям взаємодіючих форм об'єкта та губок, умовам закріплення об'єкта та податливості елементів оснащення (рис. 2).



**Рисунок 2 – Схема взаємодії об'єкту маніпулювання з опорною поверхнею**

Джерело: [12]

Зокрема, при встановленні об'єкта 2 на похилу поверхню 1 настановне зусилля  $F$  (рис. 2, а) може стати джерелом деформації в елементах конструкції захватного пристрою 3, внаслідок чого відбудеться його пошкодження (наприклад, переріз А-А на рис. 2, б). Наявність шарнірного з'єднання корпусу 3 захватного пристрою з рукою 4 промислового робота (рис. 2, г) дозволяє уникнути цього явища [12].



### 3. Вихідні дані дослідження.

Вихідними даними для аналізу взаємодії захватного пристрою з об'єктом є:

- креслення деталі,
- технологічний процес зміни форми та маси деталі,
- кінематична схема ЗП маніпулятора,
- необхідний закон руху схоплення маніпулятора під час захоплення та базування деталі,
- початкове положення та орієнтація деталі на поверхнях базування,
- інформація про траєкторію маніпулювання.

### 4. Результати дослідження

#### 4.1 Аналіз взаємодії захватного пристрою з об'єктом.

Збільшувати податливість інших ланок кінематичного ланцюга маніпуляційної системи виробничого робота (ВР) з метою виключення деформації недоцільно, оскільки податливість, наведена до загарбника пристрою, залежатиме від розташування (віддаленості) цих ланок. Тому прагнуть забезпечити податливість за рахунок елементів захватних пристроїв. Для вибору конструктивного виконання затискного елемента розглядають оптимальні умови реалізації кінематики зв'язку захватний пристрій - об'єкт, що забезпечують накладення достатніх і надлишкових зв'язків на об'єкт при його захопленні та утриманні.

За наявності жорстких губок захватний пристрій теоретично може контактувати з поверхнею об'єкта не більше, ніж у трьох точках, які є точками накладання зв'язків на об'єкт, що захоплюється. Важливо, щоб кількість зв'язків була достатньою для утримання об'єкта, а місця їхнього накладання не стали перешкодою для виконання технологічної операції. Для проектування захватного пристрою аналіз взаємодії захватних пристроїв з об'єктом маніпулювання та оснащенням є важливим науково-прикладним завданням.

Алгоритм розв'язання цього завдання передбачає:

- вибір кількості точок контакту,
- визначення конструкції контактної поверхні;



- розрахунок сил, необхідні утримання об'єкта маніпулювання.

Аналіз взаємодії захватного пристрою з об'єктом маніпулювання та оснащенням є одним з етапів проектування спеціалізованого захватного пристрою.

Алгоритм проектування захватного пристрою передбачає:

1. Визначення мінімального зусилля затиску, необхідного для утримання заготовівлі або деталі у схваті. Вибір розрахункової схеми виконується найбільш несприятливого становища схвата, тобто. положення, при якому під дією всіх прикладених сил (інерційних, дотичних і сили тяжіння) можливий зрив або зісковзування деталі із затискних губок схвату.

2. Розрахунок зусилля приводу схвата з урахуванням мінімального зусилля затиску та кінематичної схеми підсилювально-передавального механізму ЗП.

При виборі типу передавального механізму необхідно враховувати допустимі розміри та вантажопідйомність ЗП для конкретної моделі робота, необхідність плоскопаралельного або обертального руху губок захвату, а також тип приводу та конструкцію кисті маніпулятора.

3. Перевірочний розрахунок по дотичних напругах, щоб уникнути пошкодження базових поверхонь деталей.

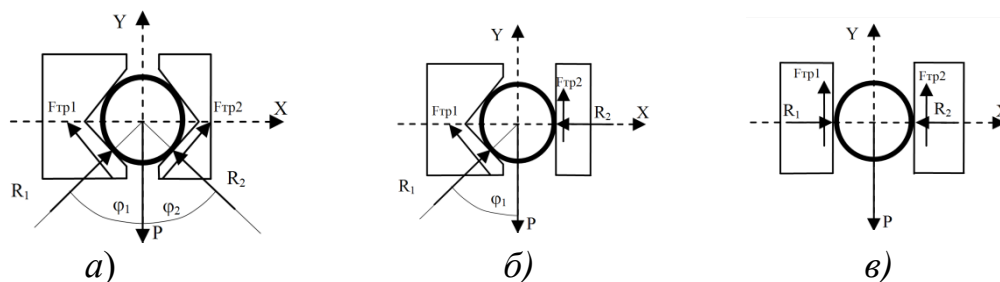
Якщо значення дотичної напруги у місцях дотику губок ЗП з деталлю перевищує допустиме для матеріалу деталі, то зменшити діючу напругу можна, збільшивши ширину губки схвата або замінивши матеріал затискних губок. Визначення параметрів та вибір двигуна для приводу ЗП.

Як приклад, наведемо результати аналізу взаємодії об'єкта маніпулювання циліндричної форми розмірами  $d=5$  см,  $h=18$  см та губок схвату різної форми (рис.3).

Для всіх розрахункових схем, наведених на рис. 3 вісь заготовки розташована перпендикулярно до площини  $XU$ , а сумарний вектор навантаження  $P$  перпендикулярний до осі заготовки. Визначимо мінімальні сили взаємодії  $R_1$  і  $R_2$ , які створюють момент, необхідний утримання заготовки. Позначимо кути між віссю  $U$  та напрямками сил взаємодії  $R_1$  та  $R_2$  відповідно



$\varphi_1$  та  $\varphi_2$ .



**Рисунок 3 – Схеми для обчислення зусилля взаємодії об’єкту та пальців (губок) схвату.**

Джерело: [12]

Сили тертя  $F_{тр1}$  і  $F_{тр2}$  виникають у точках контакту губок із заготівлею і спрямовані вздовж граней губок. Оскільки всі сили, прикладені до заготівлі, лежать в одній площині, визначити  $R_1$  і  $R_2$  можна з умови рівноваги. Для схеми взаємодії, зображеної на рис. 3, а отримаємо [12]:

$$R_1 = \frac{P(\sin \varphi_2 + \mu(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2))}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \mu \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \mu}; \quad R_2 = \frac{P \sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \mu \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \mu}. \quad (1)$$

Моделювання зусиль у середовищі Mathcad містить:

- 1) Визначення розмірів та маси об’єкту маніпулювання.
- 2) Визначення коефіцієнта тертя  $\mu$  та конструктивних кутів  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ .
- 3) Обчислення сумарного навантаження  $P$  та сил взаємодії  $R_1$  та  $R_2$ .

Моделювання зусиль взаємодії губок схвату з об’єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3 а, у середовищі Mathcad наведено на рис.4.

$$\rho := 2000 \quad d := 0.05 \quad h := 0.18 \quad \varphi_1 := \frac{\pi}{6} \quad \varphi_2 := \frac{\pi}{3} \quad \mu := 0.1$$

$$g := 9.81$$

$$P := 0.25 \pi \cdot d^2 \cdot h \cdot \rho \quad P = 0.707$$

$$R_1 := \frac{P \cdot [\sin(\varphi_2) + \mu \cdot (\cos(\varphi_1) - \cos(\varphi_2))]}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \mu \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \mu} \quad R_1 = 0.58$$

$$R_2 := \frac{P \cdot \sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \mu \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \mu} \quad R_2 = 0.321$$

**Рисунок 4 – Моделювання зусиль взаємодії губок схвату з об’єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3 а, у середовищі Mathcad**

Авторська розробка



Результати моделювання взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3, а з використанням Mathcad наведені у табл. 1.

**Таблиця 1 – Сили взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання**

$\varphi_1$	$\varphi_2$	R1, Н	R2, Н
$\pi/6$	$\pi/6$	0,386	0,386
	$\pi/4$	0,491	0,340
	$\pi/3$	0,580	0,321

Авторська розробка

Для схеми взаємодії, зображеної на рис. 3, б отримаємо [12]:

$$R_1 = \frac{P(1 + \cos \varphi_1)}{\mu \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1 + \mu}; \quad R_2 = \frac{P \sin \varphi_1}{\mu \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1 + \mu}; \quad (2)$$

Моделювання зусиль взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3 б, у середовищі Mathcad наведено на рис. 5.

$$\rho := 2000 \quad d := 0.05 \quad h := 0.18 \quad \varphi_1 := \frac{\pi}{3} \quad \mu := 0.1$$

$$g := 9.81$$

$$P := 0.25 \pi \cdot d^2 \cdot h \cdot \rho \quad P = 0.707$$

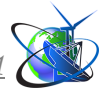
$$R1 := \frac{P \cdot (1 + \mu \cdot \cos(\varphi_1))}{\mu \cdot \sin(\varphi_1) + \cos(\varphi_1) + \mu} \quad R1 = 1.081$$

$$R2 := \frac{P \cdot \sin(\varphi_1)}{\mu \cdot \sin(\varphi_1) + \cos(\varphi_1) + \mu} \quad R2 = 0.892$$

**Рисунок 5 – Моделювання зусиль взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3 б, у середовищі Mathcad**

Авторська розробка

Результати моделювання взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання для конструкції, зображеної на рис. 3, б з використанням Mathcad наведені у табл. 2.



**Таблиця 2 – Сили взаємодії губок схвату з об'єктом маніпулювання**

$\varphi_1$	$R_1, \text{H}$	$R_2, \text{H}$
$\pi/6$	0,756	0,348
$\pi/4$	0,862	0,569
$\pi/3$	1,081	0,892

*Авторська розробка*

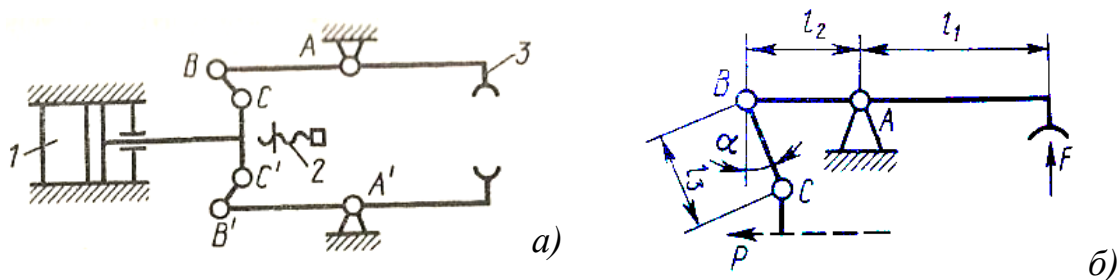
Для схеми взаємодії, зображеної на рис. 3, в отримаємо [12]:

$$R_1 = R_2 = \frac{P}{2\mu} = \frac{0,707}{0,2} = 3,535 \text{ (H)}. \quad (3)$$

Результати обчислень доводять, що математичне моделювання з використанням пакету прикладних програм Mathcad дозволяє проаналізувати сили взаємодії об'єкта маніпулювання і губок схвату, вибрати конструкцію контактних поверхонь та динамічну схему утримання об'єкту.

#### **4.2. Аналіз силового передатного відношення схвату**

Більшість механічних захватних пристроїв оснащені двома рухливими пальцями. Розрахункова схема такого захватного пристрою з плоскопаралельним рухом пальців представлена на рис.6. Схват зачиняється при подачі тиску в праву порожнину гідроциліндра 1 (рис.6, а). Кут розчинення регулюється рейкою 2. Губки 3 зазвичай виконуються змінними, їхня конструкція залежить від форми та маси деталі. На рис.6, б показана схема шарнірного механізму цього гідравлічного схвату.



**Рисунок 6 – Розрахункова схема захватного пристрою.**

*Авторська розробка*



При наявності рухливих твердих пальців, розрахунок захватного пристрою складається з:

- визначення геометричних параметрів ланок обраної кінематичної схеми передавального механізму,
- розрахунок сили  $P_1$  необхідної для захоплення й утримання деталі,
- обчислення зусилля приводу  $P$  яке надається виконавчій ланці, в залежності від сили  $P_1$ ,
- аналіз міцності елементів конструкції захватного пристрою та ланок.

В якості характеристики схвату використовують силове передатне відношення [12]:

$$K = F/P,$$

де  $F$  – сила стиснення деталі;  $P$  – зусилля приводу на вхідній ланці.

За умови рівності елементарних робіт на вході й виході механізму, запишемо:

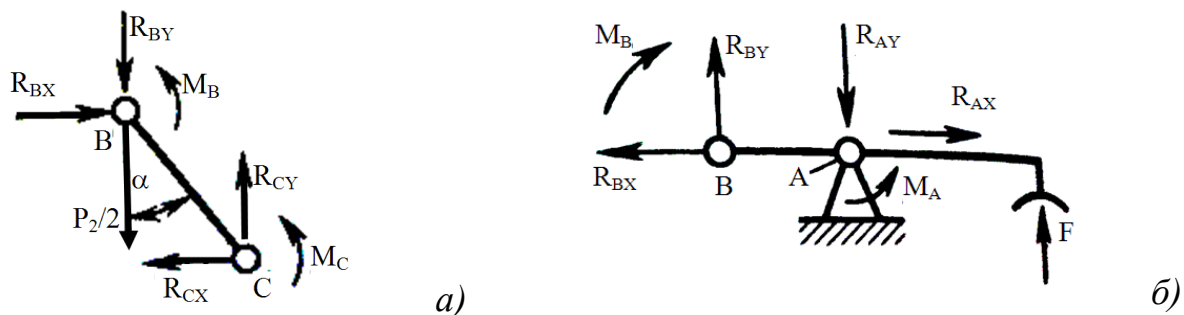
$$\delta_1 F = \delta_2 P \eta, \quad K = \delta_2 \eta / \delta_1 = \eta / K_\delta,$$

де  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – можливі переміщення на вході і виході механізму;  $K_\delta = \delta_1 / \delta_2$  – кінематичне передаточне відношення;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

Моменти сил тертя в шарнірах В і С (рис. 7, а, б) можна розрахувати за формулами:

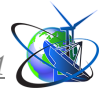
$$M_B = \frac{df}{2} \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bx}^2}; \quad M_C = \frac{df}{2} \sqrt{R_{Cy}^2 + R_{Cx}^2}.$$

де  $d$  – діаметр осей шарнірів;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $R_{By}$ ,  $R_{Bx}$ ,  $R_{Cy}$ ,  $R_{Cx}$  – сили реакції в шарнірах В і С відповідно.



**Рисунок 7 – Схеми для визначення сил реакцій і моментів у шарнірах захватного пристрою.**

Авторська розробка



При малих кутах повороту важелів схвату значення  $R_{Bx}$  і  $R_{Cx}$  значно менші ніж  $R_{By}$  і  $R_{Cy}$ , тобто ними можна зневажити, тоді

$$M_B \approx \frac{dfR_{By}}{2}; \quad M_C \approx \frac{dfR_{Cy}}{2}.$$

З умов рівноваги ланки BC (рис. 7, б) при малих  $\alpha$  маємо:

$$R_{By} \approx \frac{P \cdot l_3}{2(df + l_3\alpha)} \approx \frac{F(2l_1 + df)}{2l_2},$$

де  $l_1, l_2, l_3$  – розміри відрізків важелів схвату. Тоді силове передатне відношення можна виразити через параметри схвату:

$$K = \frac{l_2}{2l_1} \left[ \left( \alpha + \frac{df}{l_3} \right) \left( 1 + \frac{df}{2l_1} \right) \right]^{-1}.$$

При малих кутах  $\alpha$  кінематичне передатне відношення:

$$K_\delta = (2l_1/l_2) \cdot \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут нахилу вісі ланки BC до лінії, перпендикулярної до осі схвату.

В якості прикладу припустимо  $l_1=70$  мм,  $l_2=110$  мм,  $l_3=50$  мм,  $\alpha=18^\circ=0,3145$  рад,  $d=10$  мм,  $f=0,15$ ; тоді

$$K_\delta = (2l_1/l_2) \cdot \alpha = (2 \cdot 0,07/0,11) \cdot 0,3145 = 0,400;$$

$$K = \frac{l_2}{2l_1} \left[ \left( \alpha + \frac{df}{l_3} \right) \left( 1 + \frac{df}{2l_1} \right) \right]^{-1} = \frac{0,110}{2 \cdot 0,07} \left[ \left( 0,3145 + \frac{0,01 \cdot 0,15}{0,05} \right) \left( 1 + \frac{0,01 \cdot 0,15}{2 \cdot 0,07} \right) \right]^{-1} = 2,259.$$

Результати розрахунків залежності силового передатного відношення  $K$  схвату і кінематичного передатного відношення  $K_\delta$  схвату від геометричних характеристик ланок наведено у таблицях 3-5.

**Таблиця 3 – Аналіз силового передатного відношення і кінематичного передатного відношення при  $l_2=110$  мм,  $l_3=50$  мм**

$l_1, \text{ мм}$	$\alpha=6^\circ,$ $\alpha=0,104717$ рад		$\alpha=9^\circ,$ $\alpha=0,157075$ рад		$\alpha=12^\circ,$ $\alpha=0,209433$ рад		$\alpha=18^\circ,$ $\alpha=0,31415$ рад	
	$K_\delta$	$K$	$K_\delta$	$K$	$K_\delta$	$K$	$K_\delta$	$K$
30	0,057	13,277	0,086	9,562	0,114	7,470	0,171	5,197
50	0,095	8,045	0,143	5,794	0,190	4,526	0,286	3,149
70	0,133	5,771	0,200	4,156	0,267	3,247	0,400	2,259

Авторська розробка



**Таблиця 4 – Аналіз силового передатного відношення і кінематичного передатного відношення при  $l_1=110$  мм,  $l_3=50$  мм**

$l_2$ , мм	$\alpha=6^\circ$ , $\alpha=0,104717$ рад		$\alpha=9^\circ$ , $\alpha=0,157075$ рад		$\alpha=12^\circ$ , $\alpha=0,209433$ рад		$\alpha=18^\circ$ , $\alpha=0,31415$ рад	
	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K
30	0,768	1,005	1,157	0,724	1,536	0,566	2,304	0,394
50	0,461	1,676	0,691	1,207	0,922	0,943	1,382	0,656
70	0,329	2,346	0,494	1,689	0,658	1,32	0,987	0,918

*Авторська розробка*

**Таблиця 5 – Аналіз силового передатного відношення і кінематичного передатного відношення при  $l_1=110$  мм,  $l_2=110$  мм**

$l_3$ , мм	$\alpha=6^\circ$ , $\alpha=0,104717$ рад		$\alpha=9^\circ$ , $\alpha=0,157075$ рад		$\alpha=12^\circ$ , $\alpha=0,209433$ рад		$\alpha=18^\circ$ , $\alpha=0,31415$ рад	
	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K	$K_\delta$	K
30	0,209	3,210	0,314	2,398	0,419	1,914	0,621	1,364
50		3,686		2,655		2,074		1,443
70		3,937		2782		2,151		1,480

*Авторська розробка*

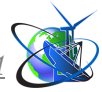
Аналіз залежностей для силового передатного відношення показує, що в обраній конструкції схвату може бути отримано велике значення K при малих кутах  $\alpha$ , однак воно падає при зменшенні  $l_3$ .

### 5. Обговорення та аналіз результатів дослідження.

Результати обчислень доводять, що математичне моделювання з використанням пакету прикладних програм Mathcad дозволяє проаналізувати сили взаємодії об'єкта маніпулювання і губок схвату, вибрати конструкцію контактних поверхонь та динамічну схему утримання об'єкту. За результатами математичного моделювання можна сформулювати такі висновки:

Непрямолінійність утворюючих поверхонь об'єктів, неточність виготовлення та похибки форми призводять до збільшення кількості точок контакту.

Неправильний підбір губок захватних пристроїв сприяє появі надлишкових зв'язків, які погіршують умови захоплення та утримання та можуть стати джерелом додаткових деформацій у ланцюзі захватний пристрій – об'єкт –



оснащення.

При малих кутах  $\alpha$  у механізмі може спостерігатися явище самогальмування, яке можна вважати перевагою цієї конструкції в аварійних ситуаціях. Однак експлуатація схвату в зоні малих  $\alpha$  робить його дуже чутливим до помилок виготовлення деталей і похибок складання.

Аналіз силового передатного відношення схвату дозволяє визначити співвідношення між силою стиснення деталі  $F$  і зусиллям приводу на вхідній ланці  $P$ .

### **Висновки**

Пакет прикладних програм Mathcad дозволяє розрахувати сили та моменти взаємодії об'єкта маніпулювання та губок схвата. Наведено розрахункові приклади, що підтверджують доцільність та ефективність використання пакета прикладних програм Mathcad для вирішення даного типу завдань.

### **Література**

Kozlova, A. & Belokopytov, R. (2025). Designing a manipulator grip. *Vestnik LSTU*. 5-9. [https://doi.org/10.53015/30343275\\_2025\\_2\\_5](https://doi.org/10.53015/30343275_2025_2_5).

Sirojuddin S., Solikhah S., Tamami M.I. (2023) Rancang bangun gripper robot manipulator 2 DOF Kapasitas 1,25 kgf, *Jurnal Rekayasa Mesin* 14(1):23-38, May 2023, DOI: [10.21776/jrm.v14i1.999](https://doi.org/10.21776/jrm.v14i1.999).

Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator, *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>

Nurfaizal, H., Maksun, M., Djaksana, Y. (2021) Prototype system kendaly robot arm gripper manipulator MENGGUNAKAN flex sensor dan MPU6050 berbasis internet of things, *Faktor Exacta* 13(4), March 2021, DOI: [10.30998/faktorexacta.v13i4.6598](https://doi.org/10.30998/faktorexacta.v13i4.6598)

Dmytriv, V., Dmytriv, I., Horodetskyu, I., & Horetska, I. (2024) A Method for Simulating the Positioning Errors of a Robot Gripper, *Applied Sciences* 14(14):6159,



July 2024, DOI: 10.3390/app14146159

Mohamed Khedr, Erfu Yang (2025) A Modular Teleoperation System for Reliable and Safer Robotic Manipulation with Integrated Force and Visual Feedback, Conference: 30th International Conference on Automation and Computing (ICAC), At: Loughborough, UK, October 2025, DOI: 10.1109/ICAC65379.2025.11196247

Temirbekov, Y., Tuleshov, A., Chsherbinin, Y., & Kaimov, A. (2023) Calculation of the Main Parameters of the Gripper of a Robotic Manipulator When Reloading Spherical and Cylindrical Objects, In book: *Advances in Mechanism and Machine Science*, November 2023, DOI: 10.1007/978-3-031-45770-8\_59

Waltersson, G., Karayiannidis, Y. (2025) Perception, control, and hardware for in-hand slip-aware object manipulation with parallel grippers, *The International Journal of Robotics Research*, November 2025, DOI: 10.1177/02783649251397549

Marco Costanzo, G. De Maria, Ciro Natale (2018) Slipping Control Algorithms for Object Manipulation with Sensorized Parallel Grippers, Conference: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2018, DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460883

Jingyao Zhang, Jiantao Yao, Jianjian Gao (2025) A novel single-DOF linkage-driven embracing gripper and its design method, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 47(2), January 2025, DOI: 10.1007/s40430-025-05388-1

Myunghyun Kim, Sumin Kang, Sungwoo Yang, Show all 5 authors, Donghan Kim (2024) Determining Grasp Positions with 4-Finger Gripper Manipulator Using Reinforcement Learning, Conference: International Conference on Intelligent Autonomous Systems, April 2024, DOI: 10.1007/978-3-031-44981-9\_15

Детали и механизмы роботов. Основы расчета, конструирования и технологии производства: учеб. пособие / Р. С. Веселков, Т. Н. Гонтаровская, В. П. Гонтаровский и др. / под. ред. Б. Б. Самопкина. – К.: Вища школа, 1990. – 343 с.



**Abstract.** The results of mathematical modeling of the interaction of gripping devices with the manipulation object and equipment are presented. interaction of gripping devices with the manipulation object and equipment. The dependence of the force transmission ratio  $K$  of the gripper and the kinematic transmission ratio  $K_{\square}$  of the gripper on the geometric characteristics of the links of the kinematic scheme of the transmission mechanism is studied. According to the modeling results, it is possible to select the number of contact points, the design of the contact surface and determine the forces required to hold the workpiece by a specialized manipulator gripper. Calculation examples are given that allow you to choose the design of the gripping device. and determine the ratio between the compression force of the part  $F$  and the drive force on the input link  $P$ .

**Keywords:** manipulator, gripping device, manipulation object, Mathcad.