

**Сергій Вікторович Лапковський¹, Володимир Костянтинівич Фролов²,
Володимир Олександрович Кравець³, Олександр Михайлович Кравець⁴,
Людмила Миколаївна Данилова⁵, Максим Миколайович Гладський⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: Lapkovsky@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. ResearcherID: HCN-3837-2022

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. ResearcherID: ACH-0071-2022

³інженер кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: bond118@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> ResearcherID: ITU-8413-2023

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: om.kravets@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. ResearcherID: IUQ-7186-2023

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: ldanylova@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. ResearcherID: ADU-9265-2022

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: gladsky@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. ResearcherID: Q-1624-2017

ПРЯМА КІНЕМАТИКА АДАПТИВНОГО ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Стаття присвячена розв'язанню завдань прямої кінематики для промислового робота, зокрема, визначення положення та просторової орієнтації його робочого органу – адаптивного захватного пристрою. На основі побудованої розрахункової схеми адаптивного захватного пристрою принципово нової конструкції створений формалізований опис можливих просторових положень його рухомих ланок. Цей формалізований опис надає можливість визначення конкретного положення кожного з контактних елементів адаптивного захватного пристрою залежно від кутів повороту первинних і вторинних рухомих фаланг.

Ключові слова: захватний пристрій; адаптивний; пряма кінематика; промисловий робот; точки контакту.

Рис.: 8. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками саме операція маніпулювання об'єктами є найпопулярнішою роботизованою операцією у сфері використання промислових роботів (ПР) (рис. 1). Цей факт підтверджується щорічними звітами Міжнародної федерації робототехніки IFR [1].

Зрозуміло, що роботизувати операцію маніпулювання об'єктами виробництва можливо тільки в тому разі, коли кінцевим ефектором ПР буде захватний пристрій (ЗП). Таким чином, дослідження ЗП, тим більше адаптивних ЗП, є актуальними.

Постановка проблеми. Технологічні досягнення останніх років у галузі промислової робототехніки дозволяють ПР, які оснащені адаптивними ЗП, виконувати широкий спектр завдань, які традиційно були притаманні лише людським рукам, дозволяючи використовувати адаптивні ЗП у широкому діапазоні захоплення та утримання різних об'єктів.

Ідеальна конструкція адаптивного ЗП повинна підлаштовуватися до різних форм об'єктів маніпулювання [2-6]. Однак, незважаючи на різноманіття ЗП, які зараз можна зустріти на промисловому ринку, є ще багато завдань, які важко або навіть неможливо виконати ЗП існуючих конструкцій. Тому досі існує попит на нові конструкції адаптивних ЗП, які могли б скласти конкуренцію руці людини.



а



б



в

Рис. 1. Відсоткове співвідношення роботизованих операцій у виробництві:

а – у 2021 році; б – у 2022 році; в – у 2023 році

Джерело: розроблено авторами.

Цей факт дозволяє стверджувати, що задача створення та дослідження нових конструкцій адаптивних ЗП існує і, як вже було зазначено раніше, є актуальною.

Підтвердженням цього є низка патентів [2, 3] та статей [4-6] фахівців КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пряма кінематика – це метод визначення положень рухомих ланок механізмів [7; 8]. Одним із основних завдань прямої кінематики є визначення положення та орієнтації кінцевої ланки механізму в базовій системі координат. Пряма кінематика широко використовується в робототехніці при кінематичному аналізі механізмів ПР. Особливо це стосується кінематичного аналізу маніпуляторів ПР. Як підтвердження можна навести публікації як українських, так і зарубіжних авторів [8-15].

Що стосується кінематичного аналізу адаптивних ЗП як окремих механізмів, то за цією тематикою публікацій вітчизняних авторів, на жаль, дуже мало. До таких робіт передусім треба віднести наукову працю [16], яка присвячена інверсній кінематиці адаптивного ЗП.

З дослідженнями та публікаціями зарубіжних спеціалістів картина дещо інша: питанням кінематичного аналізу адаптивних ЗП присвячена велика кількість наукових праць. Це насамперед спільна фундаментальна робота спеціалістів з Університету Вісконсин-Мілуокі (Мілуокі, США) та Університету Маркетта (Мілуокі, США) [17]. Також заслуговують уваги змістовні наукові роботи китайських авторів [18-20].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Наразі очевидно, що методологія кінематичного аналізу нових конструкцій адаптивних ЗП повинна вийти за рамки вирішення типових задач кінематики. Ця методологія повинна включати всебічне та глибоке дослідження можливостей адаптації ЗП маніпулятора ПР до різноманітних ситуацій і сфер використання адаптивних ЗП.

Ретельний аналіз останніх досліджень і публікацій, що були присвячені кінематиці адаптивних ЗП, дозволяють зробити висновок, що проблема розроблення методології кінематичного аналізу нових конструкцій адаптивних ЗП наразі не вирішена.

Метою статті є вирішення задачі прямої кінематики нових конструкцій адаптивних захватних пристроїв маніпулятора промислового робота для захоплення об'єктів із складною формою поверхонь.

Виклад основного матеріалу. На рис. 2 наведена конструкція адаптивного ЗП [4-6], яка була згенерована за допомогою морфологічної матриці Цвіккі [4] та спроектована із використанням такого синектичного прийому, як «метод прямої аналогії» [5]. Адаптивний ЗП згенерованої конструкції забезпечує надійне захоплення об'єктів зі складною формою поверхонь (рис. 3).

На рис. 4 наведена розрахункова схема цієї конструкції адаптивного ЗП у вихідному положенні, коли всі рухомі фаланги (і первинні, і вторинні) паралельні координатній осі OX .

На цій схемі прийняті наступні позначення:

O_1 і O_2 – осі обертання первинних рухомих фаланг;

O_{11} , O_{12} , O_{21} і O_{22} – осі обертання вторинних рухомих фаланг;

C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{21} , C_{22} , C_{23} і C_{24} – проєкції осей контактних елементів (КЕ) на вторинні рухомі фаланги;

B – відстань між осями обертання первинних рухомих фаланг;

L – відстань між осями обертання вторинних рухомих фаланг, які встановлені на одній первинній фаланзі;

l – відстань між осями КЕ, які встановлені на одній вторинній фаланзі;

d – діаметр КЕ.

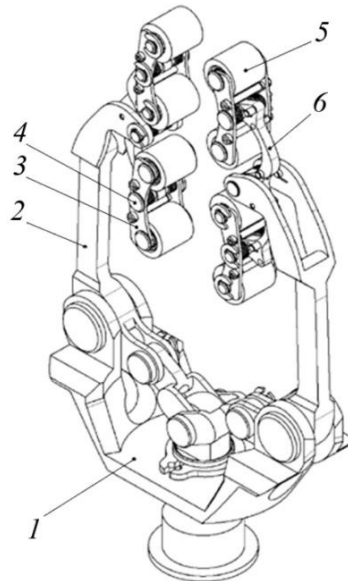


Рис. 2. Конструкція адаптивного ЗП:

1 – корпус; 2 – палець; 3 – вторинна рухома фаланга; 4 – шарнір;
5 – контактний елемент; 6 – первинна рухома фаланга

Джерело: розроблено авторами на основі [4-6].

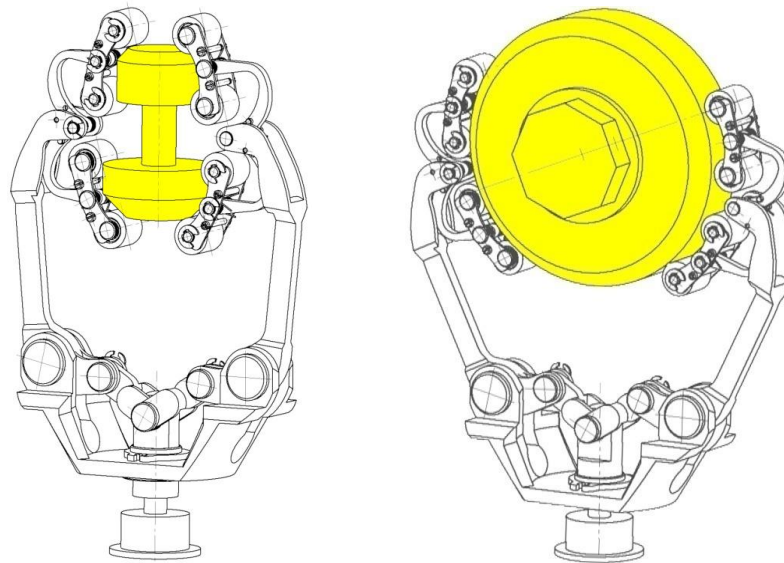


Рис. 3. Приклади захоплення адаптивним ЗП об'єктів зі складною формою поверхонь
Джерело: розроблено авторами.

Для довільного положення кінематичних ланок адаптивного ЗП, коли рухомі фаланги непаралельні одна одній, що практично завжди відбувається при захопленні складнопрофільних об'єктів, розрахункова схема конструкції адаптивного ЗП наведена на рис. 5.

На цій схемі прийняті такі позначення:

α_1 і α_2 – кути повороту первинних рухомих фаланг відносно осі OX ;

β_{11} , β_{12} , β_{21} і β_{22} – кути повороту вторинних рухомих фаланг відносно осі OX .

Для наведеної розрахункової схеми будемо вважати значення кутів α_i і β_{ij} додатними, якщо рухома фаланга повертається на відповідний кут відносно координатної осі OX проти годинникової стрілки, і від'ємними, коли рухома фаланга повертається на відповідний кут відносно координатної осі OX за годинниковою стрілкою (рис. 5).

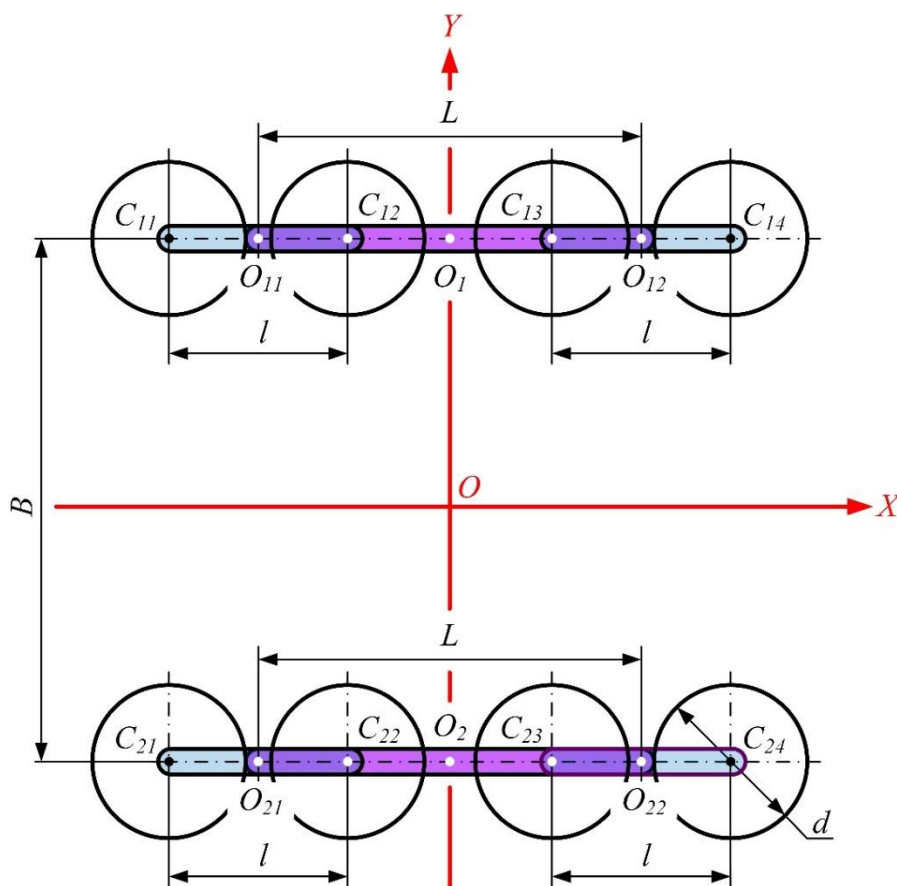


Рис. 4. Розрахункова схема адаптивного ЗП

Джерело: розроблено авторами.

Зрозуміло, що значення кутів α_i і β_{ij} будуть дорівнювати нулю в тому випадку, коли відповідні цим кутам рухомі фаланги будуть паралельні координатній осі OX (рис. 4).

З наведеного вище можна зробити висновок, що кожна рухома фаланга може знаходитися в одному з трьох станів:

- первинна рухома фаланга: $\alpha_i > 0$, $\alpha_i = 0$ і $\alpha_i < 0$;
- вторинна рухома фаланга: $\beta_{ij} > 0$, $\beta_{ij} = 0$ і $\beta_{ij} < 0$.

Згідно з рис. 2 запропонована конструкція адаптивного ЗП складається з двох пальців, кожний з яких містить три рухомі фаланги: одну первинну і дві вторинні. Якщо кожна рухома фаланга може знаходитися в одному з трьох станів, то загальна кількість станів кожного пальця адаптивного ЗП буде дорівнювати $3 \cdot 3 \cdot 3 = 3^3 = 27$.

Для всього адаптивного ЗП, який складається з двох пальців, загальна кількість станів буде дорівнювати $27 \cdot 27 = 729$, тобто рухомі фаланги адаптивного ЗП можуть створити 729 різних комбінацій можливих положень у просторі. Таке твердження проілюстроване графом станів рухомих фаланг адаптивного ЗП, який наведений на рис. 6. Деякі з комбінацій можливих положень рухомих фаланг і контактних елементів адаптивного ЗП у просторі наведено на рис. 7.

Необхідно зазначити, що на конкретне положення кожного КЕ адаптивного ЗП безпосередньо впливають:

- значення β_{ij} відповідного кута нахилу вторинної рухомої фаланги, на якій розташований даний КЕ;
- значення α_i відповідного кута нахилу первинної рухомої фаланги, на якій розташована вищевказана вторинна рухома фаланга.

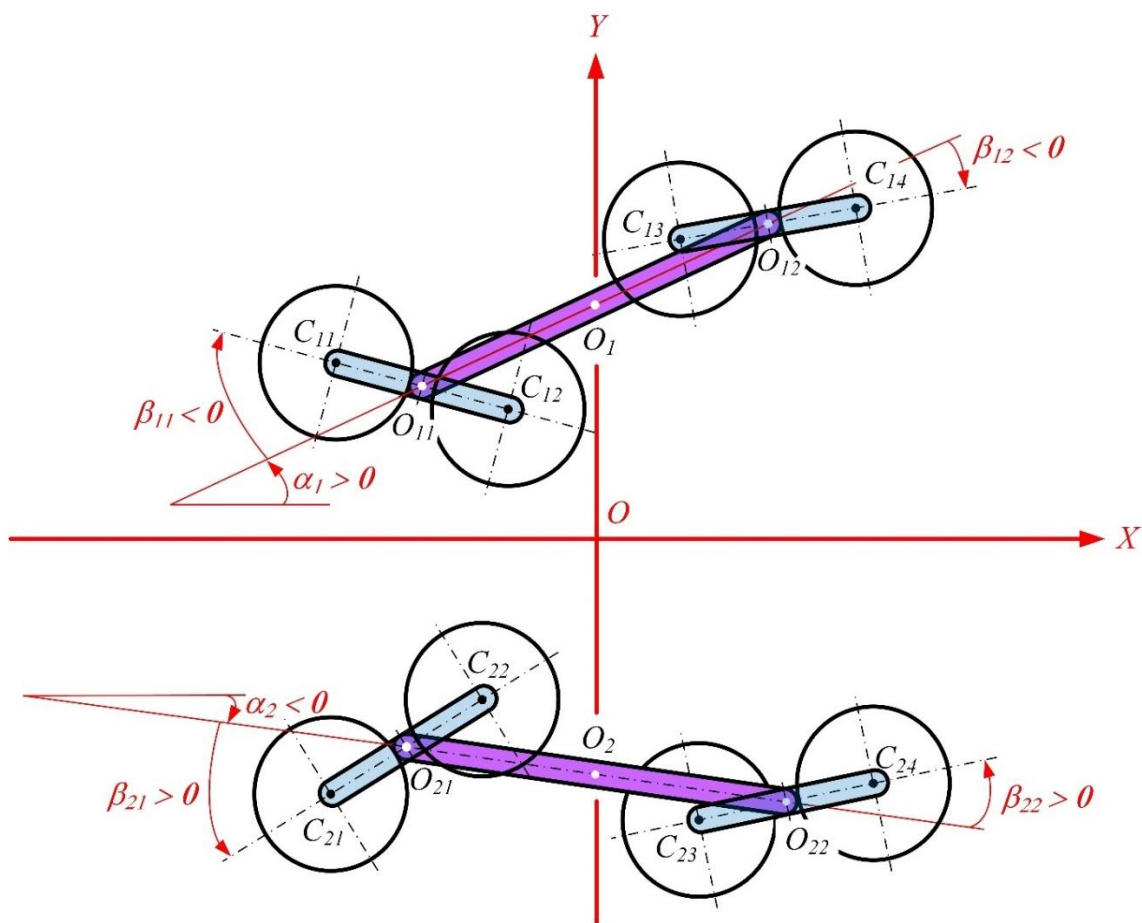


Рис. 5. Правило знаків для кутів нахилу рухомих фаланг адаптивного ЗП
Джерело: розроблено авторами.

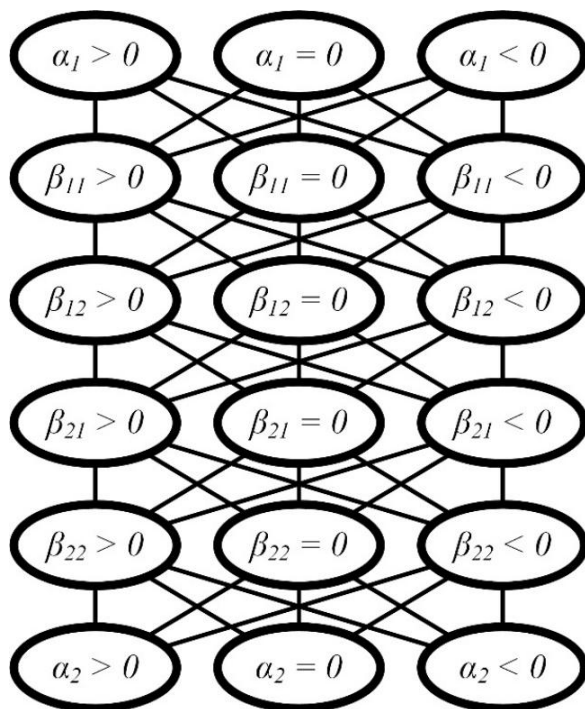


Рис. 6. Граф станів рухомих фаланг адаптивного ЗП
Джерело: розроблено авторами.

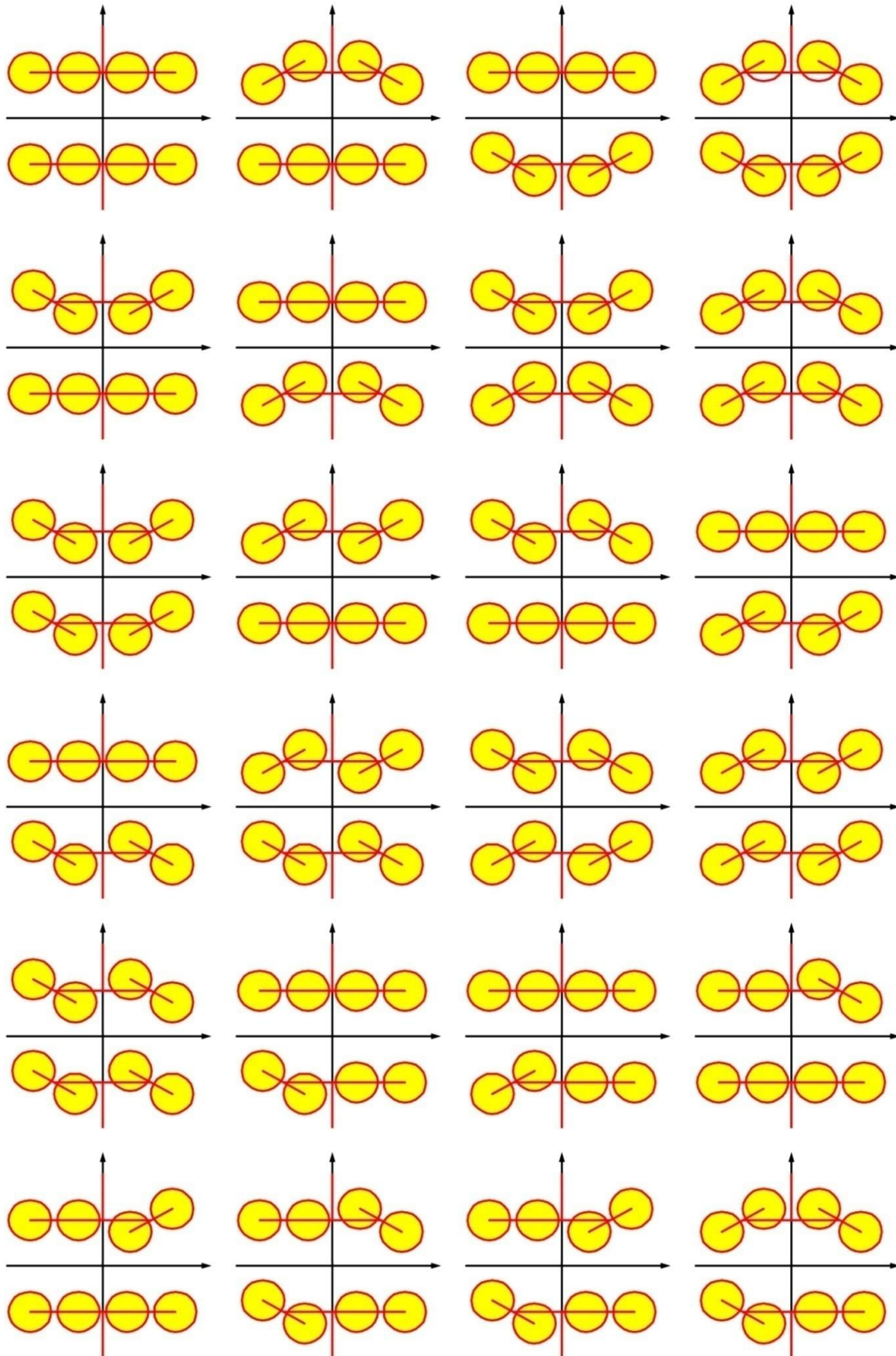


Рис. 7. Комбінації можливих положень рухомих фаланг адаптивного ЗП
Джерело: розроблено авторами.

Для визначення конкретного положення кожного КЕ достатньо буде обчислити значення координат точок C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{21} , C_{22} , C_{23} і C_{24} в залежності від значень B , L , l , α_1 , α_2 , β_{11} , β_{12} , β_{21} і β_{22} , тобто необхідно встановити наступні залежності:

$$x_{C_{11}} = f_1(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (1)$$

$$y_{C_{11}} = f_2(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (2)$$

$$x_{C_{12}} = f_3(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (3)$$

$$y_{C_{12}} = f_4(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (4)$$

$$x_{C_{13}} = f_5(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (5)$$

$$y_{C_{13}} = f_6(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (6)$$

$$x_{C_{14}} = f_7(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (7)$$

$$y_{C_{14}} = f_8(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (8)$$

$$x_{C_{21}} = f_9(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (9)$$

$$y_{C_{21}} = f_{10}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (10)$$

$$x_{C_{22}} = f_{11}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (11)$$

$$y_{C_{22}} = f_{12}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (12)$$

$$x_{C_{23}} = f_{13}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (13)$$

$$y_{C_{23}} = f_{14}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (14)$$

$$x_{C_{24}} = f_{15}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}); \quad (15)$$

$$y_{C_{24}} = f_{16}(B, L, l, \alpha_1, \alpha_2, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}). \quad (16)$$

Визначаємо координати проєкцій осей обертання первинних рухомих фаланг O_1 і O_2 :

$$x_{O_1} = 0; \quad (17)$$

$$y_{O_1} = B/2; \quad (18)$$

$$x_{O_2} = 0; \quad (19)$$

$$y_{O_2} = -B/2. \quad (20)$$

Визначаємо координати проєкцій осей обертання вторинних рухомих фаланг O_{11} , O_{12} , O_{21} і O_{22} :

$$x_{O_{11}} = -L\cos\alpha_1/2; \quad (21)$$

$$y_{O_{11}} = y_{O_1} - L\sin\alpha_1/2 = (B - L\sin\alpha_1)/2; \quad (22)$$

$$x_{O_{12}} = L\cos\alpha_1/2; \quad (23)$$

$$y_{O_{12}} = y_{O_1} + L\sin\alpha_1/2 = (B + L\sin\alpha_1)/2; \quad (24)$$

$$x_{O_{21}} = -L\cos\alpha_2/2; \quad (25)$$

$$y_{O_{21}} = y_{O_2} - L\sin\alpha_2/2 = -(B + L\sin\alpha_2)/2; \quad (26)$$

$$x_{O_{22}} = L\cos\alpha_2/2; \quad (27)$$

$$y_{O_{22}} = y_{O_2} + L\sin\alpha_2/2 = -(B - L\sin\alpha_2)/2. \quad (28)$$

Визначаємо координати проєкцій осей КЕ на вторинні рухомі фаланги C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{21} , C_{22} , C_{23} і C_{24} :

$$x_{C_{11}} = x_{O_{11}} - l\cos(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = -[L\cos\alpha_1 + l\cos(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (29)$$

$$y_{C_{11}} = y_{O_{11}} - l\sin(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = [B - L\sin\alpha_1 - l\sin(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (30)$$

$$x_{c_{12}} = x_{o_{11}} + l \cos(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = -[L \cos \alpha_1 - l \cos(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (31)$$

$$y_{c_{12}} = y_{o_{11}} + l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = [B - L \sin \alpha_1 + l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (32)$$

$$x_{c_{13}} = x_{o_{12}} - l \cos(\alpha_1 + \beta_{12})/2 = [L \cos \alpha_1 - l \cos(\alpha_1 + \beta_{12})]/2; \quad (33)$$

$$y_{c_{13}} = y_{o_{12}} - l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = [B + L \sin \alpha_1 - l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (34)$$

$$x_{c_{14}} = x_{o_{12}} + l \cos(\alpha_1 + \beta_{12})/2 = [L \cos \alpha_1 + l \cos(\alpha_1 + \beta_{12})]/2; \quad (35)$$

$$y_{c_{14}} = y_{o_{12}} + l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})/2 = [B + L \sin \alpha_1 + l \sin(\alpha_1 + \beta_{11})]/2; \quad (36)$$

$$x_{c_{21}} = x_{o_{21}} - l \cos(\alpha_2 + \beta_{21})/2 = -[L \cos \alpha_2 + l \cos(\alpha_2 + \beta_{21})]/2; \quad (37)$$

$$y_{c_{21}} = y_{o_{21}} - l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})/2 = -[B + L \sin \alpha_2 + l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})]/2; \quad (38)$$

$$x_{c_{22}} = x_{o_{21}} + l \cos(\alpha_2 + \beta_{21})/2 = -[L \cos \alpha_2 - l \cos(\alpha_2 + \beta_{21})]/2; \quad (39)$$

$$y_{c_{22}} = y_{o_{22}} + l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})/2 = -[B + L \sin \alpha_2 - l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})]/2; \quad (40)$$

$$x_{c_{23}} = x_{o_{22}} - l \cos(\alpha_2 + \beta_{22})/2 = [L \cos \alpha_2 - l \cos(\alpha_2 + \beta_{22})]/2; \quad (41)$$

$$y_{c_{23}} = y_{o_{22}} - l \sin(\alpha_2 + \beta_{22})/2 = -[B - L \sin \alpha_2 + l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})]/2; \quad (42)$$

$$x_{c_{24}} = x_{o_{22}} + l \cos(\alpha_2 + \beta_{22})/2 = [L \cos \alpha_2 + l \cos(\alpha_2 + \beta_{22})]/2; \quad (43)$$

$$y_{c_{24}} = y_{o_{22}} + l \sin(\alpha_2 + \beta_{22})/2 = -[B - L \sin \alpha_2 - l \sin(\alpha_2 + \beta_{21})]/2. \quad (44)$$

Положення у просторі та кількість точок контакту поверхні об'єкта маніпулювання з поверхнею КЕ адаптивного ЗП залежать як від форми захоплюваної поверхні, так і від форми поверхні КЕ. Зрозуміло, що форма поверхні останніх може бути різною, призначеною для виконання конкретних технологічних завдань [5].

Рівняння форми поверхні КЕ, який зображено на рис. 2-5, має такий вигляд:

$$(x - x_{c_{ij}})^2 + (y - y_{c_{ij}})^2 = (d/2)^2, \quad (45)$$

де $i = 1, 2; j = 1, \dots, 4$.

Таким чином, будь-яка точка поверхні об'єкта маніпулювання, координати якої задовольняють умові (45) з урахуванням залежностей (29)-(44), обов'язково буде мати контакт з КЕ, тобто рівняння (45) з урахуванням (29)-(44) можна вважати умовою контакту поверхні КЕ з точками захоплюваної поверхні.

На рис. 8 наведені можливі положення поверхонь КЕ у випадку захоплення зовнішніх поверхонь об'єктів маніпулювання, які були визначені згідно (45) з урахуванням (29)-(44).

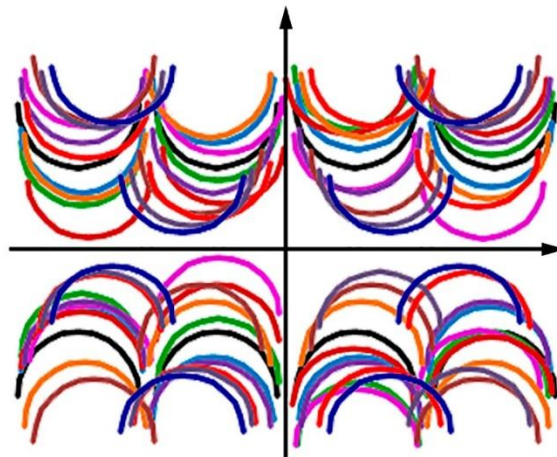


Рис. 8. Адаптація КЕ адаптивного ЗП для захоплення об'єктів із складною формою поверхонь

Джерело: розроблено авторами.

Наведена схема доводить, що запропонована конструкція адаптивного ЗП дійсно пристосована для захоплення складнопрофільних об'єктів.

Висновки. За результатами аналізу створеної розрахункової схеми адаптивного захватного пристрою нової конструкції отримана умова контакту поверхні контактного елемента з точками поверхні об'єкта маніпулювання. Результати аналізу надали змогу отримати формалізований опис припустимих положень контактних елементів захватного пристрою у просторі. Цей формалізований опис дає можливість визначення конкретного положення кожного контактного елемента в залежності від кутів повороту α_i і β_{ij} первинних і вторинних рухомих фаланг захватного пристрою. Таким чином, поставлена пряма кінематична задача адаптивного захватного пристрою промислового робота є вирішеною.

Список використаних джерел

1. International Federation of Robotics. (n.d.). Welcome to the presentation of World Robotics 2024. [ifr.org. https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf)
2. Лапковський, С. В., Фролов, В. К., Данильченко, Ю. М., Кравець, О. М., & Кравець, В. О. (2025). *Адаптивний захват промислового робота (Патент України № 160612)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1877271/>.
3. Фролов, В. К., Лапковський, С. В., Данильченко, Ю. М., Кравець, О. М., & Кравець, В. О. (2025). *Адаптивний захват робота-маніпулятора (Патент України № 160871)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1880791/>.
4. Кравець, В., Кравець, О., Лапковський, С., Фролов, В., Гладський, М., & Данилова, Л. (2024). Використання морфологічних методів при проектуванні захватних пристроїв. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 4(91), 70–75. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.8>.
5. Кравець, В., Кравець, О., Лапковський, С., Фролов, В., Сапон, С., & Приходько, В. (2024). Використання методу аналогій при проектуванні адаптивних захватних пристроїв. *Технічні науки та технології*, 4(38), 80–91. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-80-91](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-80-91).
6. Лапковський, С., Фролов, В., Кравець, В., Кравець, О., Данилова, Л., & Приходько, В. (2025). Використання принципу дії фрактальних лещат при проектуванні адаптивних захватних пристроїв. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1(92), 137–143. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.17>.
7. Jazar, R.N. (2022). Forward Kinematics. *Theory of Applied Robotics*. pp. 225-311. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93220-6_5.
8. Kucuk, S. & Bingul, Z. (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics. *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. pp. 117-148. <https://doi.org/10.5772/5015>.
9. Ashhepkova, N. (2021). Devising a method to analyze the current state of the manipulator workspace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(109)), 63–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225121>.
10. Koshovyi, M., D., Ashhepkova, N. S., & Luchko, A. S. (2021). Modeling of manipulator grip reaches with regard to generalized coordinate constraints. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 63–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/123>.
11. Дмитрієва, І., & Левченко, Д. (2015). Дослідження кінематичної моделі маніпуляційного робота. *Системні технології*, 98(3), 57–62. http://nbuv.gov.ua/UJRN/st_2015_3_10.
12. Huang, H., Dong, E., Xu, M., Yang, J., & Low, K.H. (2018). Mechanism design and kinematic analysis of a robotic manipulator driven by joints with two degrees of freedom (DOF). *Industrial Robot*, 45(1), 34-43. <https://doi.org/10.1108/IR-07-2017-0137>.
13. Corke, pp. (2017). Robot Arm Kinematics. *Robotics, Vision and Control*, 118, 193–228. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7.
14. Othayoth, R.S., Chittawadigi, R.G., Joshi, R.P., & Saha, S.K. (2017). Robot kinematics made easy using RoboAnalyzer software. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(5), 669–680. <https://doi.org/10.1002/cae.21828>.

15. Gao, G., Liu, Y., Wang, H., Song, M., & Ren, H. (2015). Workspace calculating and kinematic modeling of a flexible continuum manipulator constructed by steel-wires. *Industrial Robot*, 42(6), 565-571. <https://doi.org/10.1108/IR-03-2015-0039>.

16. Мажара, В. А., Годунко, М. О., Кислун, О. А., & Ковальчук, Є. В. (2014). Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 27. 28–34. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2014_27_6.

17. Hernandez, J., Sunny, M. S. H., Sanjuan, J., Rulik, I., Zarif, M. I. I., Ahamed, S. I., Ahmed, H. U., & Rahman, M. H. (2023). Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review. *Robotics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/robotics12010005>

18. Chen, C., Liang, Y., Sun, J., Lin, C., & Wen, Y. (2024). Adaptive pneumatic soft gripper with embedded flexible bending sensor. *Industrial Robot*, 51(2), 358-368. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2023-0275>.

19. Tian, Z., Cheng, H., Zhao, L., & Zhao, J. (2023). Research on two-stage grasping planning method for multifingered dexterous hand. *Robotic Intelligence and Automation*, 43(4), 431-442. <https://doi.org/10.1108/RIA-02-2023-0013>.

20. Cheng, P., Ye, Y., Yan, B., Lu, Y., & Wu, C. (2023). A novel soft gripper with enhanced gripping adaptability based on spring-reinforced soft pneumatic actuators. *Industrial Robot*, 50(4), 595-608. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2022-0103>.

References

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2024. (dateless). ifr.org. https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf.

2. Lapkovskiy, S. V., Frolov, V. K., Danylchenko, Yu. M., Kravets, O. M., & Kravets, V. O. (2025). Adaptivnyi zakhvat promyslovoho robota (Patent Ukrainy № 160612). [Adaptive gripper for an industrial robot (Ukrainian Patent No. 160612)]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1877271/>.

3. Frolov, V. K., Lapkovskiy, S. V., Danylchenko, Yu. M., Kravets, O. M., & Kravets, V. O. (2025). Adaptivnyi zakhvat robota-manipuliatora (Patent Ukrainy № 160871). [Adaptive gripper for a robotic manipulator (Ukrainian Patent No. 160871)]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1880791/>.

4. Kravets, V., Kravets, O., Lapkovskiy, S., Frolov, V., Hladskiy, M., & Danylova, L. (2024). Vykorystannia morfolohichnykh metodiv pry proiektuvanni zakhvatnykh prystroiv [The use of morphological methods in the design of gripping devices]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Journal of Kherson National Technical University*, 4(91), 70–75. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.8>.

5. Kravets, V., Kravets, O., Lapkovskiy, S., Frolov, V., Sapon, S., & Prykhodko, V. (2024). Vykorystannia metodu analohii pry proiektuvanni adaptivnykh zakhvatnykh prystroiv [The use of the analogy method in the design of adaptive gripping devices]. *Technical Sciences and Technology – Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 4(38), 80–91. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-80-91](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-80-91).

6. Lapkovskiy, S., Frolov, V., Kravets, V., Kravets, O., Danylova, L., & Prykhodko, V. (2025). Vykorystannia pryntsyphu dii fraktalnykh leshchat pry proiektuvanni adaptivnykh zakhvatnykh prystroiv [The application of the principle of fractal clamps in the design of adaptive gripping devices.] *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Journal of Kherson National Technical University*, 1(92), Ch. 1, 137–143. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.17>.

7. Jazar, R. N. (2022). Forward Kinematics. *Theory of Applied Robotics* (pp. 225-311). https://doi.org/10.1007/978-3-030-93220-6_5.

8. Kucuk, S. & Bingul, Z. (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics. *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, 117-148. <https://doi.org/10.5772/5015>.

9. Ashhepkova, N. (2021). Devising a method to analyze the current state of the manipulator workspace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(109)), 63–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225121>.

10. Koshoviy, M., D., Ashhepkova, N. S., & Luchko, A. S. (2021). Modeling of manipulator grip reaches with regard to generalized coordinate constraints. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 63–74. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/123>.

11. Dmytriieva, I., & Levchenko, D. (2015). Doslidzhennia kinematychnoi modeli manipuliatsiinoho robotu. [A study of the kinematic model of a robotic manipulator.] *Systemni tekhnologii – System technologies*, 98(3), 57–62. http://nbuv.gov.ua/UJRN/st_2015_3_10.
12. Huang, H., Dong, E., Xu, M., Yang, J., & Low, K.H. (2018). Mechanism design and kinematic analysis of a robotic manipulator driven by joints with two degrees of freedom (DOF). *Industrial Robot*, 45(1), pp. 34–43. <https://doi.org/10.1108/IR-07-2017-0137>.
13. Corke. (2017). Robot Arm Kinematics. *Robotics, Vision and Control*, 118, pp. 193–228. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7.
14. Othayoth, R.S., Chittawadigi, R.G., Joshi, R.P., & Saha, S.K. (2017). Robot kinematics made easy using RoboAnalyzer software. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(5), 669–680. <https://doi.org/10.1002/cae.21828>.
15. Gao, G., Liu, Y., Wang, H., Song, M., & Ren, H. (2015). Workspace calculating and kinematic modeling of a flexible continuum manipulator constructed by steel-wires. *Industrial Robot*, 42(6), 565–571. <https://doi.org/10.1108/IR-03-2015-0039>.
16. Mazhara, V. A., Hodunko, M. O., Kyslun, O. A., & Kovalchuk, Ye. V. (2014). Vyznachennia kutiv povorotu veduchykh lanok adaptivnoho zakhvatnoho prystroiu [Determination of the rotation angles of the drive links of the adaptive gripping device]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of Scientific Papers of Kirovohrad National Technical University. Technology in Agricultural Production, Sector-Specific Mechanical Engineering, Automation*, 27, 28–34. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2014_27_6.
17. Hernandez, J., Sunny, M. S. H., Sanjuan, J., Rulik, I., Zarif, M. I. I., Ahamed, S. I., Ahmed, H. U., & Rahman, M. H. (2023). Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review. *Robotics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/robotics12010005>.
18. Chen, C., Liang, Y., Sun, J., Lin, C., & Wen, Y. (2024). Adaptive pneumatic soft gripper with embedded flexible bending sensor. *Industrial Robot*, 51(2), 358–368. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2023-0275>.
19. Tian, Z., Cheng, H., Zhao, L., & Zhao, J. (2023). Research on two-stage grasping planning method for multifingered dexterous hand. *Robotic Intelligence and Automation*, 43(4), 431–442. <https://doi.org/10.1108/RIA-02-2023-0013>.
20. Cheng, P., Ye, Y., Yan, B., Lu, Y., & Wu, C. (2023). A novel soft gripper with enhanced gripping adaptability based on spring-reinforced soft pneumatic actuators. *Industrial Robot*, 50(4), 595–608. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2022-0103>.

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.03.2026

UDC 621.865.8

**Serhii Lapkovsky¹, Volodymyr Frolov², Volodymyr Kravets³, Oleksandr Kravets⁴,
Liudmyla Danylova⁵, Maksym Gladskyi⁶**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

³Engineer of the Department of machine design
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: bond118@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/ITU-8413-2023)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: om.kravets@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/IUQ-7186-2023)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ldanylova@outlook.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: gladsky@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. ResearcherID: Q-1624-2017

FORWARD KINEMATICS OF THE ADAPTIVE GRIPPER OF INDUSTRIAL ROBOT

The article is devoted to solving the problems of direct kinematics for adaptive gripping devices of both industrial robots and manipulators installed on mobile platforms and intended for neutralizing various explosive objects of complex shape. The article is based on the paradigm that the design of an adaptive gripping device of an industrial robot in any case must necessarily adapt to different shapes of the surfaces of the manipulation object that needs to be captured. The article presents a calculation scheme of the adaptive gripper of a fundamentally new design. Based on the proposed calculation scheme, the article presents a formalized apparatus for describing possible positions in space of each moving link of the adaptive gripper. This formalized description provides the ability to determine the specific position of each of the contact elements of the adaptive gripper depending on the angles of rotation of the two primary and four secondary moving phalanges. The presented method of formalized description allows to determine in a systematic way the specific position of each of the contact elements of the adaptive gripper of any shape. The article presents the obtained condition of contact of the surface of the contact elements of a round shape of the adaptive gripper with the points of the surface of the manipulated object. This condition can be transformed into a condition of contact of the surface of the contact elements of any shape. The information presented in the article requires further careful research, because it can be used both in solving problems of inverse kinematics of adaptive grippers of manipulators of industrial robots and mobile platforms, and in performing various force calculations of adaptive grippers.

Keywords: gripper; adaptive; forward kinematics; industrial robot; contact points.

Fig.: 8. **References:** 20.