

СПЕЦІАЛЬНІ РОЗРОБКИ

621.865.8:662

Р.С. Филь

ЗАСАДИ ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ МАНІПУЛЯТОРІВ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДЛЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ (Частина I)

У статті розглядаються питання проектування маніпуляторів спеціалізованих роботів. Визначаються основні технічні характеристики механічної частини та її системи керування. Проводиться класифікація кінематичної частини маніпулятора. Надаються рекомендації щодо архітектури маніпулятора залежно від умов експлуатації.

Ключові слова: мобільний робот, маніпулятор, конфігурація ланок, кінематична схема, система приводу, робоча зона.

В статье рассматриваются вопросы проектирования манипуляторов специализированных роботов. Определяются основные технические характеристики механической части и ее системы управления. Проводится классификация кинематической части манипулятора. Даются рекомендации по архитектуре манипулятора в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: мобильный робот, манипулятор, конфигурация звеньев, кинематическая схема, система привода, рабочая зона.

Paper deals with the design of specialized robots manipulators. The main technical characteristics of the mechanical part and its control system are identified. The classification of the kinematic manipulator is carried out. Several recommendations on the architecture of the manipulator, depending on the operating conditions.

Keywords: mobile robot, manipulator, configuration units, kinematic scheme, drive system, working area.

Постановка проблеми. Останні десятиріччя бурхливого розвитку у світі зазнають галузі промисловості, які прямо чи опосередковано пов'язані з виробництвом високотехнологічних товарів, з впровадженням нових технологій, у тому числі й використання різноманітних роботів та робототехнічних комплексів.

І хоча подібна техніка коштує недешево, а її створення ще дорожче, передові держави світу вживають заходів для забезпечення своїх сил правопорядку й регулярних армій спеціалізованими робототехнічними комплексами. При цьому намагаються замінити такими комплексами людей, робота яких пов'язана зі значним ризиком для життя й здоров'я.

Робота сапера-вибухотехніка є складною й небезпечною. У випадках розмінування саморобних вибухових пристроїв найбільшу небезпеку становить невизначеність його будови й алгоритму спрацювання. Саме тому над створенням мобільних роботів (далі – МР), здатних дистанційно виявляти та знешкоджувати вибухонебезпечні предмети (далі – ВП), працюють багато компаній у всьому світі.

На цей час у Україні питання забезпечення вибухотехнічних підрозділів Експертної служби МВС України подібними роботами є невирішеним, розв'язання якого дозволить підвищити захищеність співробітників, які безпосередньо виявляють та знешкоджують саморобні ВП.

Метою статті є дослідження конструкції маніпуляторів спеціалізованих МР для виявлення та знешкодження ВП та вироблення рекомендацій щодо їх проектування.

Виклад основного матеріалу. Головним робочим органом МР для виявлення та знешкодження ВП є маніпулятор. За допомогою його та комплекту змінного робочого інструменту він виконує всі підготовчі та більшість головних операцій по знешкодженню ВП, які, зазвичай, має особисто виконувати сапер-вибухотехнік.

Забезпечити відтворення дій і рухів людської руки в рухах маніпулятора складно, а тому до питання проектування маніпулятора необхідно підходити ретельно і комплексно.

Сучасний ступінь розвитку мікроелектроніки дозволяє розробити компактну, високопродуктивну, надійну систему керування маніпулятора, однак проектування механічної частини маніпулятора може створити певні труднощі. Ці труднощі пов'язані з необхідністю комплексного підходу до задачі проектування механічної частини маніпулятора. Більшість використаних конструкторських рішень будуть визначатися сукупністю технічних характеристик, таких як кількість ланок маніпулятора МР, його габарити, діапазон можливих навантажень, а також очікувані прискорення і швидкість переміщення.

Для того аби маніпулятор міг виконувати різні завдання з достатньою точністю, необхідно забезпечити міцність та жорсткість таких його складових, як підшипники, вали, з'єднання. При виборі двигунів необхідно враховувати можливість їх короткочасного перевантаження, а також прискорення обертання, статичний момент, інерційність. У випадку використання зубчатих передач необхідно, в першу чергу, враховувати граничні навантаження на зуб. Підшипники і вали необхідно підбирати з урахуванням робочого навантаження та структурних особливостей системи. З'єднання ланок доцільно проектувати з урахуванням необхідного діапазону руху і точності маніпулятора.

Безумовно, під час проектування необхідно дотримуватись вимог чинних стандартів, що дозволить максимально використати стандартні деталі. Тобто конструкція маніпулятора дозволяє більшість вузлів не проектувати новими, а обрати з готових рішень, представлених на нашому ринку вітчизняними чи іноземними виробниками.

Перші зразки МР, що використовувались у промисловості й послужили прото-типом при створенні спеціальних роботів для потреб армії та поліції, мали надлишкову універсальність, тому що призначалися для виконання різноманітних завдань. Перед-бачалось, що високий ступінь технологічної гнучкості зробить їх конкурентоздатними. Однак збільшення гнучкості цих систем досягалось за рахунок підвищення вартості й ускладнення технічного обслуговування [4].

Тобто перед початком проектування маніпулятора для МР необхідно чітко визначити специфіку завдань, які він повинен виконувати. Саме цей етап проектування і буде першим та найбільш важливим етапом проведення конструкторської роботи, без якого неможливо скласти список вимог до маніпулятора і визначити його експлуатаційні характеристики. На сьогоднішній

день ще не існують зразки МР, здатні виконувати необмежено широкий перелік завдань. Таким чином, гнучкість маніпулятора повинна розглядатися лише в межах завдань, для яких він призначений.

Завдяки такому вибору буде обрано єдину вірну конфігурацію маніпулятора з можливих альтернативних варіантів. Також рекомендується під час проведення ДКР, перш ніж перейти до етапу створення робочої конструкторської документації, в рамках ескізного проекту перевірити можливості конструкції на виготовленому макеті. Цей крок допоможе конструктору знайти і вирішити ряд питань, пов'язаних з геометричними особливостями системи, структурною цілісністю, прокладкою магістралей і використанням робочого простору.

Зрозуміло, що з безлічі альтернатив, що виникають на стадії робочого проектування МР, необхідно вибрати найбільш доцільні рішення. Однак, як свідчить практика, знайти цей єдиний вірний варіант є достатньо складним завданням. Пояснюється це тим, що в більшості випадків з обраного проектного рішення впливають суперечливі вимоги до окремих компонентів системи [5].

З метою виключення можливих помилок під час проектування маніпулятора для МР розглянемо нижче основні засади проектування подібних виробів та запропонуємо відповідні рекомендації. Для простоти розіб'ємо рекомендації на дві частини. В першій частині наведемо ті, які будуть стосуватися загальних технічних характеристик маніпулятора і визначаються замовником. У наступній – ті, що дозволять конструктору більш детально визначити архітектуру створюваного маніпулятора.

Розглянемо більш детально **технічні характеристики маніпулятора**, а саме його робочу зону, конфігурацію ланок й їх механічні характеристики.

Робочий простір, робоча зона і робочі діапазони. При проектуванні робочої зони маніпулятора необхідно чітко визначити майбутні області обмеженого доступу – так звані “мертві зони” (рис.1).

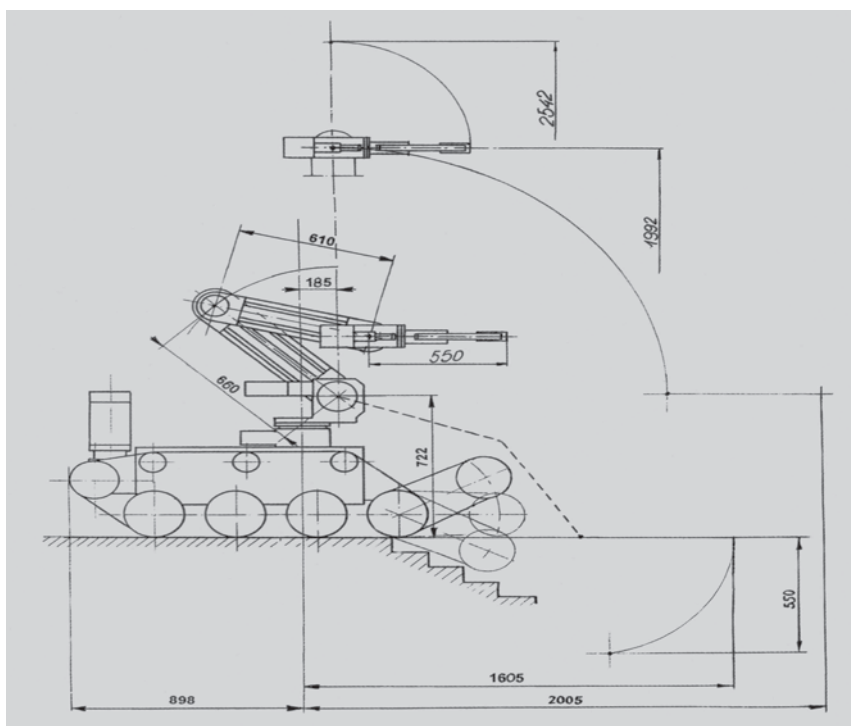


Рис. 1. Приклад позначення границь робочої зони сингулярного маніпулятора (мобільний робот iNpector SR-11)

Необхідність визначення таких областей викликана тим, що в більшій частині робочого простору будуть цілком використовуватися всі ступені рухливості ланок маніпулятора (діапазони переміщення ланок, довжини з'єднань, кутів між осями, а також їх комбінації), які можливо отримати в обраній для нього системі координат (рис. 2).

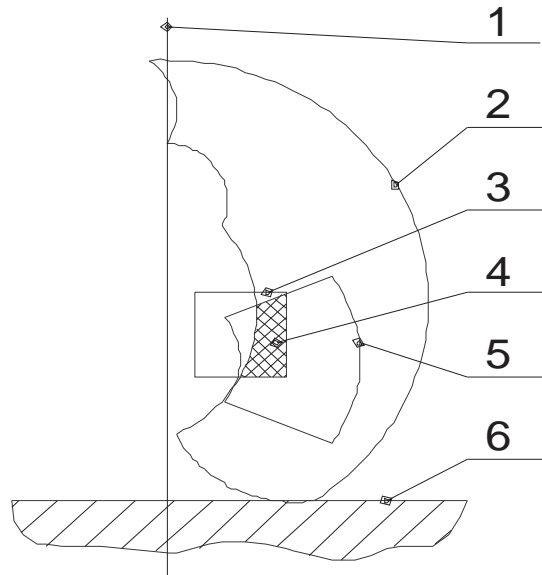


Рис. 2. Робочі зони, характерні для маніпуляторів різного типу
(1 – ось обертання маніпуляторів; 2 – зона сингулярного маніпулятора; 3 – зона маніпулятора з циліндричною системою координат; 4 – зона загальна для всіх типів маніпуляторів; 5 – зона маніпулятора зі сферичною системою координат; 6 – підлога)

Маніпулятори побудовані з використанням ротаційних (обертальних) зчленувань краще працюють всередині робочих діапазонів ланок, аніж на їх границях. Можливі переміщення вузлів й ланок маніпулятора повинні бути обрані з запасом, щоб забезпечити переорієнтацію при зміні встановленого на нього робочого інструменту (захватного пристрою, гідроруйнувача, газоаналізатор тощо).

Вантажопідйомність. Вантажопідйомність – одна з найбільш важливих характеристик маніпулятора. Вона тісно пов'язана з величинами робочих швидкостей та прискорень. З огляду на специфіку роботи МР, пов'язану з безпосередньою роботою з вибухонебезпечними предметами, основна увага повинна приділятися питанням стабілізації швидкості, рівномірності її зміни, а також точності переміщення по траєкторії, заданій оператором.

Вантажопідйомність повинна розглядатися як змінна величина [5]. Залежно від типів виконуваних задач, як то розвідка, переміщення або знищення ВП, більш доцільно описувати конструкцію маніпулятора в термінах корисної вантажопідйомності, ніж враховувати її фактичні граничні значення. При визначенні вантажопідйомності необхідно враховувати інерцію навантаження, силу ваги та можливі коливання об'єкта в захватному пристрої. Ці фактори впливають на вибір конструкцій захвату, зап'ястя та системи приводів. Звичайно, вантажопідйомність в значній мірі залежить від граничного прискорення маніпулятора і від граничних значень обертаючих моментів, прикладених до зап'ястя. Крім того, навантаження впливає на параметри, що забезпечують стійкість електромеханічної системи, а саме: статичну структурну деформацію маніпулятора,

величину сталого моменту двигунів приводу, частоту власних коливань системи та їх згасання, а також вибір коефіцієнту передачі системи сервокерування.

Конфігурація ланок

1. *Кінематична схема маніпулятора.* Схема маніпулятора буде визначатися робочою зоною, системою керування, вимогами гнучкості до огинання перешкод і загальними структурними вимогами. Маніпулятори, що працюють у декартовій системі координат (з ротаційними зчленуваннями чи без них), характеризуються простими рівняннями керування і перетворення координат. Ортогональність осей поступального руху спрощує розрахунок положення ланок для заданої орієнтації. Рівняння керування теж досить прості, оскільки ланки динамічно незалежні (до членів другого порядку) [2]. Технічно простіше сконструювати й виготовити надійніше ротаційне зчленування, ніж поступальне з великим діапазоном переміщення, до того ж порядок керування маніпулятором з подібними зчленуваннями буде більш зрозумілим для оператора.

2. *Число ступенів рухливості.* Незважаючи на те, що для забезпечення довільного положення робочого інструменту маніпулятора всередині визначеної робочої зони потрібно не менше 6-ти ступенів рухливості, для виконання простих завдань можна обійтися і меншою їх кількістю [1]. Завдяки виключенню деяких ланок з процесу переміщення можна підвищити вантажопідйомність і точність маніпулятора (рис. 3). Тобто доцільно під час виконання простих операцій типу згортання-розгортання маніпулятора з похідного положення в робоче, автоматичної зміни робочого інструменту, грубого виведення оператором маніпулятора в зону роботи з ВП, завантаження ВП до встановленого на МР вибухозахисного контейнера та ін. фіксувати зайві ланки маніпулятора.

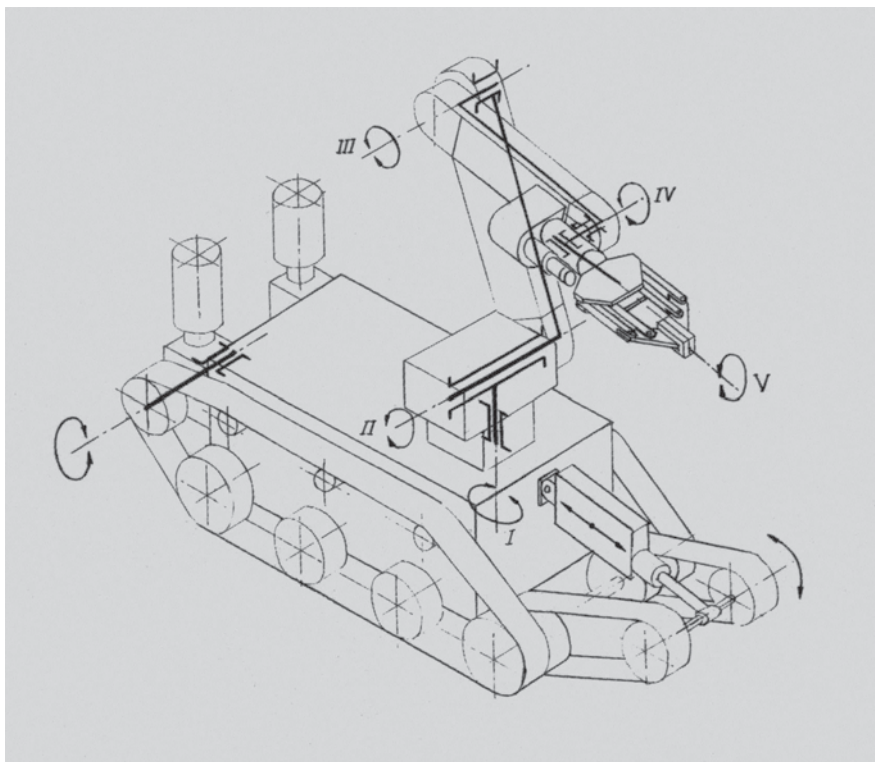


Рис. 3. Кінематична схема маніпулятора, який завдяки реалізації спеціального алгоритму керування ланок дозволяє оперувати з корисним вантажем вагою від 30 до 60 кг.
(мобільний робот iNspector SR-11)

3. *Діапазон переміщень ланки.* Для конфігурації, побудованої з використанням ротаційних зчленувань, основний обсяг робочого простору визначається переміщеннями в плечовому і ліктьовому зчленуваннях. За рахунок зап'ястя забезпечується зміна орієнтації робочого інструменту всередині цього обсягу. Розширюючи діапазони переміщення ланок, можна збільшити кількість дійсних положень робочого інструменту та кількість альтернативних способів їх досягнення [2]. Ця властивість може виявитися дуже корисною, якщо передбачається, що створювана модель МР буде працювати з ВП в обмеженому просторі, тобто в жилих помешканнях, складських приміщеннях, технічних спорудах та всередині автомобіля, літака чи залізничного транспорту (рис. 4) [3].

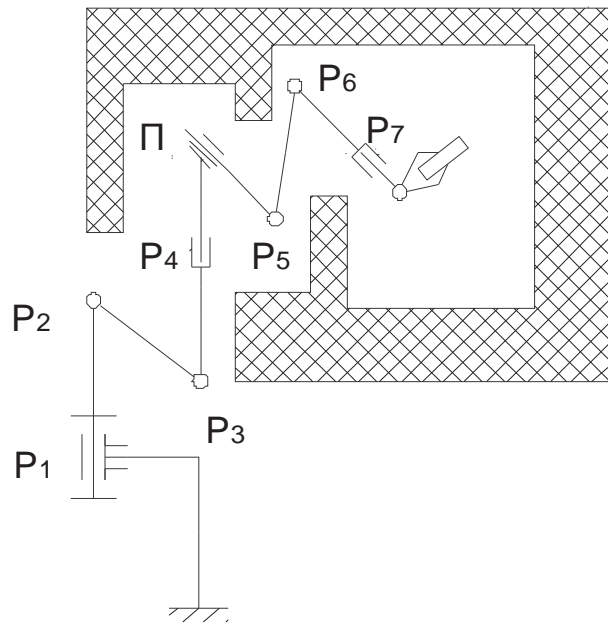


Рис. 4. Кінематична схема маніпулятора з розширеним діапазоном переміщень для обслуговування важкодоступних місць робочої зони.

Швидкість переміщення ланок. Максимальна швидкість переміщення ланки (кутова чи лінійна) є залежною величиною. Звичайно, вона обмежена напругою в ланцюзі сервоуправління чи максимальною швидкістю обертання двигуна [1].

При проектуванні маніпулятора необхідно врахувати, що існують дві основні задачі реалізації переміщень маніпулятора:

- переміщення з великим прискоренням;
- переміщення з малим прискоренням.

Перший випадок характерний для виконання операцій по відпрацюванню заздалегідь завданої траєкторії. До таких операцій необхідно віднести автоматичну зміну робочого інструмента, згортання-розгортання маніпулятора з похідного положення після пересування МР в район пошуку ВП, проведення самодіагностики і т.д. У цьому випадку обмеження швидкості починає діяти при малих переміщеннях.

Другий випадок відноситься до безпосередньої роботи з виявленим ВП, під час якої виконуються найбільш “делікатні” операції, як то:

- одержання доступу до виявленого вибухонебезпечного пристрою;
- переміщення ВП, розкриття корпусу та обстеження його внутрішньої будови;
- проведення маніпуляцій по знешкодженню ВП (розрив токового ланцюга електродетонатора, знищення джерел струму або масиву ВР, гідродинамічне руйнування і т.д.).

У цьому випадку обмеження швидкості починає діяти при переміщеннях, близьких до розмірів робочої зони маніпулятора.

Прискорення ланок. У більшості випадків при проведенні операцій по знешкодженню ВП маса виявленого пристрою у порівнянні з масою маніпулятора є незначною і тому чимала частина енергії витрачається на прискорення маніпулятора. У таких випадках необхідно враховувати інерцію системи, яка призводить до значних коливань у кінцевій точці траєкторії.

Для зменшення інерційності системи і поліпшення експлуатаційних характеристик маніпулятора рекомендується розміщати важкий привід у безпосередній близькості від першої осі для обертального або поступального руху [4].

Мінімально-можливе переміщення маніпулятора. Ця характеристика визначає величину мінімального переміщення маніпулятора. Під час створення маніпулятора розрахункові значення здатності не будуть відповідати практично отриманим результатам головним чином тому, що результат такого розрахунку не може достеменно відбивати вплив тертя, скручування, мертвого ходу, кінематичної структури маніпулятора, фактичний люфт ланок й приводу, постійну погрішність системи сервокерування, погрішності виготовлення і зборки.

Також на цей показник буде впливати завданий діапазон переміщень ланки. Це пояснюється тим, що здатність типового шифратора або датчика положення ланки є величиною дискретною і кінцевою. Його значення буде кратним й складатиме від $1/256$ до $1/1024$ частини цього переміщення.

Реальна здатність типового багатоланкового маніпулятора завжди буде гірша ніж здатність окремих його ланок [2].

Точність позиціонування маніпулятора. Цей параметр відбиває здатність системи керування маніпулятором встановити закріплений робочий інструмент в деяке завдане оператором або сервісною програмою положення у просторі. Точність позиціонування буде залежати в першу чергу від точності математичної моделі маніпулятора (типу зчленувань, довжини ланок, кількісної оцінки деформацій ланок й зчленувань під навантаженням тощо), від адекватності моделі робочого інструмента, а також від повноти і точності рішення рівнянь, що описують ці моделі.

Для поліпшення відповідності маніпулятора обраній математичній моделі необхідно в процесі експлуатації МР передбачити виконання періодичних калібрувань, підстроювання приводів ланок, юстирування зчленувань.

Типові величини точності позиціонування маніпуляторів можуть лежати в межах від ± 100 мм (для некаліброваних маніпуляторів зі спрощеною кінематичною моделлю) до $\pm 0,01$ мм (для маніпуляторів із простими і точними моделями, точними алгоритмами визначення керуючих параметрів і високоточною виконавчою частиною) [5].

Термін служби компонентів маніпулятора. Визначаючи термін служби створюваного маніпулятора з електромеханічним приводом необхідно взяти до уваги, що його майбутню надійність будуть визначати швидкість зносу колекторів

та щіток двигунів, ступінь припустимого стирання зубців передач та їх граничні навантаження, можливість багатократного перегинання з'єднувальних кабелів. Під час розрахунку проектного терміну служби варто орієнтуватися на виконання типових завдань у найбільш несприятливих умовах. Середній гарантійний ресурс по виконанню малих переміщень (менше 5 % робочого діапазону переміщень ланки) повинний складати не менше 30 млн циклів, а для великих переміщень (понад 50 % робочого діапазону переміщень ланки) – до 10 млн циклів. Виконуючи проектування маніпулятора, необхідно добиватися, аби середній час напрацювання до першої відмови був не менш 1000 годин, а до капітального ремонту – не менш 2500 годин [5].

Характер майбутньої роботи ланок маніпулятора МР буде повторно-коротко-часним або короткочасним, а тривалість більшості операцій буде на кілька порядків менше часу перегріву електродвигуна. Таким чином, при проектуванні типові значення експлуатаційних характеристик можна обмежити максимальним навантаженням на передачу, а нелінійні значення визначити, виходячи з теплового режиму електродвигуна. Для забезпечення обраних умов роботи бажано каналом телеметрії передавати інформацію з температурних датчиків двигунів.

У зв'язку з невизначеністю умов експлуатації маніпулятор, під час його використання необхідно припускати можливість непередбаченого зіткнення встановленого на ньому робочого інструмента з перешкодами, що будуть знаходитися в робочій зоні. Ступінь виникаючих при цьому ушкоджень багато в чому буде залежати від конструкції самого маніпулятора. У більшості випадків подібні зіткнення будуть призводити до появи тріщин або поломки зубів передач чи валів, деформації ланок, зрізання шпонок шестерень або шківів, обриву керуючих та силових проводів й кабелів, злому електричних контактів, виводу зі строю арматури і кінцевих вимикачів, а тому необхідно ще на етапі ескізного проекту передбачити протиударні властивості майбутньої конструкції маніпулятора.

(Закінчення у наступному номері)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник / Ю.Г. Козырев. – М. : Машиностроение, 1988. – С. 7–20, 140–148.
2. Коловский М.З. Основы динамики промышленных роботов / М.З. Коловский, А.В. Слоущ. – М. : Наука, 1988. – С. 7–12.
3. Костюк В.И. Промышленные роботы / В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольский и др. – К. : Вища школа, 1985. – С. 39–51.
4. Петров Б.А. Манипуляторы / Б.А. Петров. – Л. : Машиностроение, 1984. – С. 115–148.
5. Справочник по промышленной робототехнике. Под ред. Ш. Нофа (пер. с англ. / Г.В. Зубрицкий, Д.Ф. Миронов, Е.Т. Михеева). – М. : Машиностроение, 1990.