

**ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ**

УДК 621.865.8

М.В. Богдановський, студ.**В.А. Кирилович, к.т.н., доц.****І.В. Сачук, аспір.***Житомирський інженерно-технологічний інститут***ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ
ДИНАМІКИ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ**

Розглянуто проблему автоматизованого аналізу динамічних характеристик агрегатно-модульних промислових роботів (АМ ПР). Зазначені конструктивно-технологічні особливості АМ ПР та наведені існуючі основні підходи до динамічного аналізу кінематичних структур. Представлено пропонувану схему динамічного аналізу кінематичних структур АМ ПР та зазначено перспективність подальших досліджень динамічних характеристик АМ ПР.

Вибір промислових роботів (ПР) як універсальних засобів автоматизації є обов'язковою задачею при проектуванні роботизованих технологічних комплексів (РТК). Наприклад, в складі РТК механоскладання ПР виконують технологічні операції завантаження-розвантаження основного технологічного обладнання та транспортування предметів виробництва. При виконанні таких допоміжних технологічних операцій ПР агрегатно-модульної конструкції є пріоритетними по відношенню до ПР із сталою кінематичною структурою. АМ принцип побудови ПР дозволяє на базі обмеженої групи нормалізованих вузлів скласти спеціалізовану конструкцію ПР, яка найбільш повно відповідає вимогам вирішення конкретної технологічної задачі. При цьому від кожного агрегатного вузла вимагається закінченість та конструктивна самостійність його механізмів, міцність та жорсткість конструкції в межах типорозміру, можливість компоновань в різних положеннях та сполученнях з іншими вузлами за рахунок уніфікації стикових з'єднань останніх. Модульний принцип побудови ПР передбачає складання кінематичних структур на основі функціонально довершених вузлів, які функціонують згідно з власним призначенням конструктивно незалежно один від одного. Все це дозволяє при аналізі динаміки АМ ПР розглядати останній як послідовність з'єднання окремих функціональних вузлів, що володіють певними інерційно-пружно-дисипативними динамічними характеристиками та впливають на кінематичну пару, до складу якої входять. При цьому внаслідок зазначених конструктивних особливостей побудови АМ ПР відсутні складні конструктивні та функціональні зв'язки поміж окремими функціональними вузлами поза кінематичними парами, що впливають на динаміку ПР.

Динамічний аналіз ПР є одним з необхідних етапів на стадії проектування та перевірки відповідності ПР за конкретними технологічними вимогами до виконання заданої виробничої операції [9]. Динамічні процеси, що відбуваються в роботах, суттєво впливають на точність позиціювання, яка є однією з найбільш важливих параметрів ПР, що визначає якість його функціонування. Динамічні навантаження виявляються зазвичай достатньо вагомими при оцінці міцності, жорсткості та довговічності конструкції.

Дослідження динаміки робота є складною задачею. При її рішенні повинні враховуватись взаємодія між окремими виконавчими механізмами ПР з урахуванням конструктивних особливостей останніх, взаємодія механічної системи з приводною системою та системою управління рухом.

На сьогоднішній день існує досить багато підходів та методик аналізу динаміки функціонування ПР, розроблених вітчизняними та зарубіжними дослідниками в цій галузі. Проте в багатьох з них існують проблеми відсутності загальних підходів при розв'язанні даних задач, формалізації, наявності багатьох припущень, умов та нехтувань окремими складовими системи об'єктів аналізу. Це пояснюється значною складністю математичного апарату при аналізі реальних умов функціонування ПР.

Динамічний аналіз маніпуляторів в багатьох пропонуваних методиках проводиться на підґрунті попереднього кінематичного аналізу, який дозволяє формалізувати основні фізичні, конструктивні властивості системи та описати кінематичні зв'язки між ними.

Одним з найбільш перспективних з точки зору застосування обчислювальної техніки при аналізі динамічних характеристик ПР є метод, що ґрунтується на використанні рівнянь Лагранжа 2-го роду [6]. Серед основних переваг даного методу є його універсальність та зручність при врахуванні пружних властивостей вузлів маніпулятора. З іншого боку, даний метод зручний при аналізі динаміки агрегатно-модульних (АМ) ПР через відносно нескладне представлення кожного складового модуля АМПП. Однак пряме використання рівнянь Лагранжа 2-го роду пов'язано з необхідністю обчислення похідних від кінетичної енергії. Це вносить значні похибки і потребує перетворення вихідних рівнянь. Результат аналізу динаміки ПР представляється у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

де i – номер ланки ПР;

q_i – узагальнена координата i -ої ланки;

L – функція Лагранжа;

Q_i – узагальнена сила, що діє на i -ту ланку.

Рівняння Лагранжа 1-го роду на відміну від рівняння Лагранжа 2-го роду дозволяє врахувати реакції зв'язків системи та зовнішні сили, але потребує попередньої аналітичної обробки для конкретного маніпулятора. Результатом аналізу є система диференціальних рівнянь, що у матричній формі має вигляд:

$$Q_i = \text{tr} \left\{ \sum_{i=j}^n (-\Phi_i^e U_{ij}^T + \sum_{k=1}^i U_{ik} H_i U_{ij}^T \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^i U_{ikl} H_i U_{ij}^T \dot{q}_k \dot{q}_l) \right\}, \quad (2)$$

де Φ_i^e – матриця зовнішніх сил, що діють на ланку;

H_i – матриця, що характеризує інерцію i -ої ланки;

U – матриці відносних переміщень ланок;

q – узагальнені координати.

Частина вхідних даних даного методу отримується при кінематичному аналізі маніпулятора за допомогою матриць взаємного розташування модулів. При аналізі динамічної точності ПР відхилення за даним методом можна розглядати як нові узагальнені координати та використовувати рівняння Лагранжа [7].

Інша методика аналізу динаміки ПР дозволяє не формувати диференціальних рівнянь, а знайти дійсні значення узагальнених прискорень, мінімізуючи деяку квадратичну форму [6]. В основу методу покладено принцип Гауса, що придатний до систем з різними видами зв'язків. Загалом даний метод, як і метод рівнянь Лагранжа 1-го роду, призводить фактично до однієї і тієї ж системи лінійних диференціальних рівнянь та дає можливість скласти рівноцінні програми рішення. Передбачається також попередня аналітична підготовка, що враховує особливості конкретного маніпулятора, тому необхідно відмітити складність універсального автоматизованого аналізу.

Ще однією методикою наближеного аналізу динамічної точності маніпуляційної підсистеми є методика, в основу якої покладено метод аналізу статичних похибок з урахуванням заміни узагальнених сил від статично прикладених сил динамічними з урахуванням заданих рухів системи [19]. В результаті проведеного аналізу можна визначити деформацію центра схвату. Але даний метод не дає можливості врахувати динамічні помилки, що викликані власними коливаннями системи маніпулювання, а значить визначити перехідні процеси, врахування яких дуже важливе при оцінці часових затрат на виконання ПР технологічних операцій і переходів та часу циклу в цілому. З урахуванням даних коливань розрахунок значно ускладнюється, оскільки потребує аналізу малих коливань системи з гнучкими ланками поблизу траєкторії робочого руху. Практика свідчить про те, що точніший розрахунок дає значення динамічних помилок, що у 2...2,5 рази більші від значень наближеного розрахунку [19]. Результат аналізу динамічної похибки ПР за даним методом представляється у вигляді зміщення ΔX , ΔY , ΔZ внаслідок деформації центра схвату.

Ще одним перспективним напрямком представлення динаміки маніпуляційних роботів є метод зв'язаних графів [18]. Головною його перевагою є те, що даний метод може бути використано для маніпуляторів будь-якої складності (багатосхватні, із замкненою кінематичною структурою тощо). Однак, не дивлячись на надзвичайно універсальний характер та потужність цієї методики, вона викликає проблеми, пов'язані з достатньо громіздкою базою, що

відображає характер зв'язків всіх складових маніпуляційної системи, починаючи від механічних і закінчуючи інформаційними. Обробка цієї інформації для кожної конкретної моделі ПР носить достатньо інтелектуальний характер, а формалізація представляється в графічному вигляді, що ускладнює алгоритмізацію та автоматизований аналіз динаміки ПР за даною методикою. Результат аналізу є ідентичним в порівнянні з рівняннями Лагранжа 2-го роду. Іншими словами можна відмітити, що дана методика доцільна у випадку аналізу складної маніпуляційної системи, де більш прості методики не може бути використано.

Окрім наведених класичних методик проведення аналізу динамічних характеристик існує цілий ряд публікацій [5, 13, 15, 16], присвячених вирішенню даної задачі з використанням нових методів підвищеної ефективності з точки зору математичного апарату та алгоритмізації.

Необхідно відмітити той факт, що більшість методик спрямована на синтез конструкцій ПР з необхідними динамічними характеристиками, а не їх аналіз з подальшим вибором, що притаманно АМ ПР. Ця спрямованість часто не дозволяє врахувати певні особливості конструкцій ПР, які суттєво можуть впливати на динаміку останнього. З іншого боку бажано, щоб методика мала універсальний характер та була придатна до використання аналізу динамічних характеристик ПР будь-якої конструкції. Крім того, обов'язковими вимогами є можливість автоматизації обраної методики. Іншими словами, аналіз динаміки ПР є складною та суперечливою задачею, при вирішенні якої дослідник повинен сам визначити важливість ступеня наближеності результатів аналізу динаміки АМ ПР за обраною методикою до реальних динамічних характеристик його систем.

Широкого розповсюдження в робототехніці набули моделі маніпуляторів, які представляються у вигляді системи твердих тіл, що поєднані пружними зв'язками [8]. Такі моделі дозволяють врахувати просторовий рух ланок при наявності великої кількості ступенів рухомості. Вводячи пружні зв'язки між твердими тілами, можливо також врахувати пружні властивості ланок передатних механізмів. Вони дозволяють також деякою мірою врахувати пружні властивості основних ланок, приводячи їх піддатливість до шарнірів та таким чином визначити динамічні характеристики маніпуляційної системи.

Приклад пропонованої схеми автоматизованого аналізу динаміки одного з найбільш простих і поширених АМ ПР з пневмоприводом представлений на рис. 1. Рівняння динаміки ПР представляються у формі Лагранжа 2-го роду з урахуванням пружності найбільш піддатливої ланки – руки маніпулятора.

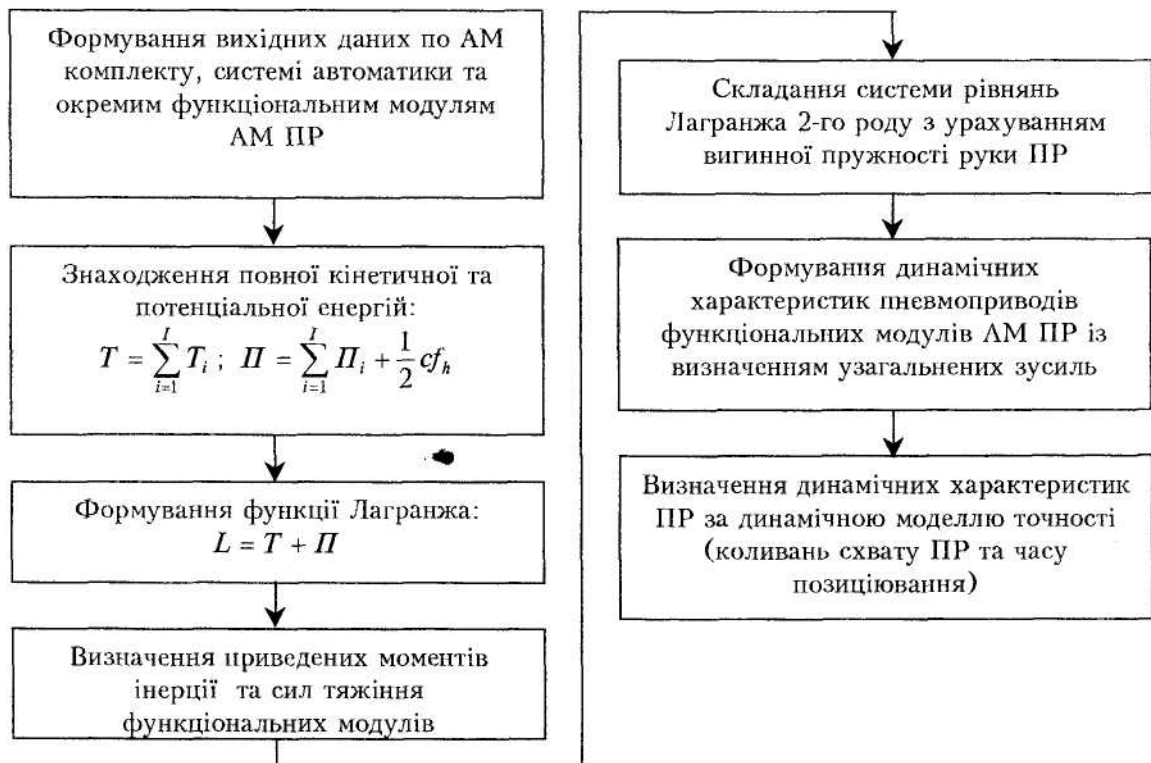


Рис. 1. Схема автоматизованого аналізу динаміки АМ ПР з пневмоприводом

Суттєвий вплив на динаміку АМ ПР чинять динамічні характеристики пневмоприводів функціональних модулів [2]. Через свою природу вони мають суттєво нелінійний характер та потребують врахування при складанні динамічної моделі переміщення схвату ПР. Крім піддатливості модулів роботів АМ конструкції в напрямку дій інерційних та потенційних сил необхідно враховувати піддатливість в зчленуваннях окремих пар модулів [10, 11, 12]. Через те, що АМ ПР складаються на базі окремих вузлів, значна кількість зчленувань може суттєво впливати на його динамічні характеристики та бути основним джерелом статичних та динамічних похибок. Необхідне також врахування пружності передатних механізмів виконавчої та механічної частин системи, вплив яких може бути особливо суттєвим при використанні електроприводів. При цьому необхідно враховувати сили тертя в елементах передатних механізмів та якість їх зчеплення (люфти та зазори). Необхідно відмітити, що врахування наведених чинників, що впливають на динаміку АМ ПР, при аналізі виконується окремо, являючи собою самостійні задачі.

Враховуючи відмічені особливості АМ побудови ПР та чинники, спричинені цими особливостями, що впливають на його динаміку, необхідно зазначити перспективність подальших досліджень в даному напрямку. Створення методичного та алгоритмічного забезпечення отримання динамічних характеристик АМ ПР, максимально наближених до реальних, дозволить аргументовано виконувати вибір необхідної кінематичної структури останнього, яка задовольняє відповідним технологічним вимогам при виконанні заданої операції. Крім того, наявність даного забезпечення дозволить проаналізувати вплив параметрів настроювання окремих складових елементів ПР на технологічні параметри їх роботи і таким чином покращити ефективність використання АМ ПР.

Результатом створення подібного методичного та алгоритмічного забезпечення є підвищення якості конструктивно-технологічних рішень, що приймаються на етапі вибору та аналізу кінематичних структур АМ ПР для конкретної технологічної задачі, а також скорочення тривалості процесу проектування РТК.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Арайс Е.А., Дмитриев В.М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
2. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 264 с.
4. Манипуляционные системы роботов / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес и др.; под. общ. ред. А.И. Корендясева. – М.: Машиностроение, 1989. – 432 с.
5. Волтарев Н.Л., Бурдаков С.Ф. Математические модели динамики и точность робота ТУР-10 при движении на низких скоростях // Ленингр. политехнич. инст. – 1988. – № 428. – С. 35.
6. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: в 3т. / Под ред. К.И. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
7. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: в 3т. / Под ред. К.И. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с.
8. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: в 3т. / Под ред. К.И. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 3: Основы конструирования / Е.И. Воробьев, А.В. Бабич, К.П. Жуков. – М.: Высш. шк., 1989. – 383 с.
9. Коловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 240 с.
10. Проектирование и разработка промышленных роботов / С.С. Аншин, А.В. Бабич, А.Г. Баранов и др.; Под ред. Я.А. Шифрина, П.Н. Белянина. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
11. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин и др.; Под ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.

12. Промышленные роботы: Конструирование и применение / Г.А. Спыну; Под ред. докт. тех. наук В.И. Костюка. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 176 с.
13. Решение обратной задачи динамики и кинематики для многосвязного гибкого робота. Inverse dynamics and kinematics of multilink elastic robots: fun iterative frequency domain approach / Bayo Eduardo, Paradopoulos Philip, Stubbe James, Sema Miguel Angel // Int. J. Bob. Res. – 1989. – 8, № 6. – С. 49–62. – Англ.
14. Сачук И.В. Алгоритмічне забезпечення автоматизованого вибору АМ ПР.: Магістерська атестаційна робота. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 208 с.
15. Упрощение динамики манипулятора на основе аппроксимации функции. Manipulator dynamic simplification based on function approximation / Lin C. S., Bejczy A.K., Chang P.R. // Int. J. Bob. And Autom. – 1988. –2, № 2. – С. 97–104. – Англ.
16. Заремба А.Т. Уравнения динамики многосвязного манипулятора с голономными связями // Изв. АН СССР. Мех. тверд. тела. – 1990. – № 4. – С. 25–34.
17. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
18. Шахинтур М. Курс робототехники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527с.
19. Шисман В.Е. Точность роботов и робототехнических систем. – Харьков. Вища школа, 1988. – 154 с.

БОГДАНОВСЬКИЙ Мартін Віталійович – студент Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– математичне моделювання динаміки АМ ПР.

Тел. дом. 38/0412-49-50-57.

E-mail: mart_ua@ukr.net

КИРИЛОВИЧ Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– автоматизація технологічної підготовки механоскладального машино- та приладобудівного автоматизованого виробництва;

– автоматизація технологічних процесів.

Тел. дом. 38/0412-33-89-78.

E-mail: kiril_v@ziet.zhitomir.ua

САЧУК Ілона Володимирівна – аспірант Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– автоматизація технологічної підготовки механоскладального виробництва.

Тел. дом. 38/0412-37-59-15.

Подано 5.06.2002