

М.З. Лаврівський (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності), Р.В. Зінко, к.т.н., доцент, І.С. Лозовий, к.т.н., доцент (Національний університет "Львівська політехніка")

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ЯК ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Проведено аналіз досліджень маніпуляторів як шарнірно-зчленованих механічних систем. Основна увага надавалася теоретичним та експериментальним дослідженням їх динаміки. Основні напрямки досліджень полягають у визначенні динамічних навантажень, що діють в ланках маніпулятора під час його роботи; підвищення точності відстеження заданої траєкторії та позиціонування робочим органом машини. Подальші задачі досліджень полягають у створенні методики дослідження динаміки шарнірно-зчленованих систем загального виду з пружними і жорсткими ланками, яка була б придатна для автоматизованого розрахунку.

Вступ. Серед нових зразків аварійно-рятувальної техніки, що застосовується при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, все ширше використовуються підйомно-транспортні, вантажно-розвантажувальні машини та механізми. Тому, покращення існуючих і створення нових високопродуктивних конструкцій вантажопідйомних кранів і маніпуляційних роботів вимагає подальшого дослідження динаміки багатоланкових механізмів з багатьма ступенями вільності. При розробці нових машин та механізмів необхідно проводити дослідження з метою дотримання законів руху і мінімізації навантаження в ланках механізму, необхідно враховувати все більше число факторів в тому числі і таких, які раніше не брались до уваги: податливість ланок, тертя в кінематичних парах, характер зміни параметрів і структури динамічної системи. Зараз спостерігається тенденція, що якщо для вирішення деякої задачі існує або може бути побудовано послідовне, оглядове і чітке аналітичне або числове рішення, то ним необхідно скористатися незалежно від об'єму обчислення. Вимога якісного виконання розрахунку нової машини, який включає її всесторонню розрахункову перевірку, підтверджує такий підхід, а існуючий рівень забезпеченості і досконалості електронно-обчислювальних машин дозволяє його реалізацію. Важливо, щоб розроблені чисельні методи були доступні для повсякденної практики проектування.

Серед перспективних напрямків створення нових зразків аварійно-рятувальної, підйомно-транспортної техніки є розробка роботизованих маніпуляторів. Робототехніка – відносно новий, напрямок науки і техніки, який швидко розвивається, пов'язаний зі створенням та використанням роботів і робото-технічних систем. Робототехніка, як самостійний науковий напрямок, виникла на основі механіки і кібернетики. В той же час розвиток робототехніки стимулювало розвиток суміжних наук.

Серед роботів важливим класом є маніпуляційні роботи. Специфіка маніпуляційних роботів пов'язана з наявністю складного механізму його виконавчого органу – маніпулятора.

Значення маніпуляційних роботів не можна зводити лише до можливості розв'язку на їх основі задач комплексної автоматизації промислового виробництва. Вони знайшли застосування і в інших областях господарства: в транспорті, в сільському господарстві, на будівництві, під час виконання робіт, пов'язаних з ліквідацією надзвичайних ситуацій.

Науково-методичні підстави дослідження. Матеріалами досліджень були публікації в техніко-економічних, періодичних вітчизняних та закордонних виданнях. Методика досліджень містить два критерії оцінки їх змісту:

- важливість розвитку методів аналізу та синтезу, дослідження маніпуляційних роботів;
- складність алгоритмів дослідження.

Результати досліджень. Створенню маніпуляційних роботів передували великі наукові дослідження, в які внесли значний вклад академік І.І.Артоболовський, член кореспонденти АН СРСР І.М.Макаров, Д.Е.Охоцимський, Е.П.Попов та інші вчені.

Перші взірці маніпуляційних роботів в СРСР з'явилися в 1971 р. Вони були створені під керівництвом члена-кореспондента АН СРСР П.Р.Беляніна і Б.Н.Сурніна. На кінець вісімдесятих років було створено понад 250 моделей маніпуляційних роботів, з яких понад 50 виготовлялися серійно.

Різноманітним аспектам конструкції та роботи маніпуляційних роботів присвячена значна кількість робіт. Так в роботах [1-3] викладені питання кінематики, динаміки і керування маніпуляційних роботів. Конструкція та їх застосування в сучасних виробництвах описані в книгах [4, 5].

Маніпуляційний робот являє собою єдину динамічну систему що включає дві органічно пов'язані частини: пристрій керування і маніпулятор. Маніпулятор з точки зору механіки і теорії механізмів – це складний просторовий керований механізм з кількома ступенями вільності, який включає жорсткі та пружні ланки, приводи, передачі. Через складність цієї системи в існуючих дослідженнях виділяють і розглядають окремо механізми, приводи та системи керування. Рух ланок маніпулятора відбувається за допомогою приводів, які можуть бути розташовані на рухомих ланках або на нерухомій основі. Число приводних двигунів, як завжди, дорівнює числу ступенів вільності маніпулятора. Передача руху від двигуна до ланки механізму відбувається за допомогою передаточних механізмів різноманітних конструкцій. Система передаточних механізмів може бути достатньо складною.

Дослідженню динаміки маніпуляторів різноманітних видів присвячені роботи А.Р.Верещагіна, Є.І.Зенкевича, А.Є.Кобрінського, А.Г.Овакімова, М.М.Полякова, Є.П.Попова, Ю.А.Степаненка, Є.І.Юрєвича і інших авторів.

Найбільш повно методи дослідження руху маніпуляційних систем, як складних багатоланкових механічних об'єктів з довільною кінематичною конфігурацією і з довільним числом ступенів рухомості викладені в роботі [2].

Складність розрахунку маніпуляторів обумовила розвиток методів, орієнтованих на застосування ЕОМ. Досить зручним з цієї точки зору є метод матриць. Застосування методу матриць до кінематики маніпуляторів вперше подано в роботі [6].

В роботах [2, 7, 8] описуються методи і алгоритми, які дозволяють досліджувати динаміку багатоланкових просторових механізмів з розімкнутим ланцюгом, базовані на формальному отриманні руху за допомогою блочних матриць. В цих роботах ланки маніпулятора представляються в вигляді жорстких однорідних стержнів, характеристики яких наперед відомі. Однак, при очевидній зручності запису рівнянь руху ланок маніпулятора в матричній формі виникають значні труднощі при формуванні матриць інерції, жорсткості, матриці переходу рухомих координатних систем до нерухої (базової) координатної системи.

В роботі [9] наведено ефективний метод опису кінематики і виведені повні рівняння динаміки маніпуляційного робота з врахуванням просторового руху маніпулятора, розглянуті питання керування роботом. Однак, важко погодитись з правомірністю припущень про абсолютну жорсткість ланок маніпулятора.

Математичні моделі механічних систем, які складаються з рухої основи і маніпуляторів, розглянуті в роботі [10]. Отримано ряд спрощених моделей вказаних систем.

В роботі [11] представлена математична модель, яка описує рух ланок підвісного вантажопідійомного маніпулятора з просторовим виконавчим механізмом за допомогою якої досліджені його динамічні параметри. Динамічна модель представлена у вигляді тримасової системи, в якій вся металоконструкція вважається абсолютно жорсткою. В роботі також не враховані маси виконуючого механізму та силових гідроциліндрів. Алгоритми моделювання

динаміки керованих маніпуляторів з врахуванням пружності ланок наведені в роботах [12, 13].

Наявність деформації в ланках механізму, суттєво впливає на рух робочих органів, погіршує перехідні процеси, створює умови виникнення нестационарних коливань і т.д [14, 15]. Особливо сильно пружні властивості ланок маніпулятора проявляються при експлуатації їх зі значними пришвидшеннями (режим розгону та гальмування).

В роботі [16] отримані диференціальні рівняння руху маніпуляційного робота з сервоприводами з врахуванням пружності ланок механізму. Розглядається механічна модель з масами зосередженими в шарнірних вузлах. Рівняння потім лінеаризуються.

Спробою відмовитися від загальноприйнятого припущення про абсолютну жорсткість ланок шарнірно-зчленованих систем є робота [17], в якій за допомогою хвильових рівнянь описана динаміка консольної основи робота який рухається.

В роботах [6, 18] складені рівняння руху з врахуванням пружності тільки однієї ланки для якого-небудь конкретного механізму.

Особливістю задач аналізу динаміки маніпуляторів є значна складність рівнянь руху їх ланок. Це призводить до необхідності розвивати методи автоматизації побудови рівнянь динаміки руху ланок маніпуляторів. Для побудови систем диференціальних рівнянь використовуються різноманітні методи аналітичної механіки. Велике число автоматизованого формування рівнянь руху елементів маніпуляторів базується на рівняннях Лагранжа I і II роду. Застосування рівнянь Лагранжа пов'язане з формуванням і диференціюванням виразів для кінетичної і потенціальної енергії кінематичного ланцюга. Р.М. Кулаков показав, що для простих незамкнутих кінематичних ланцюгів можна уникнути числового диференціювання [19]. Рівняння Лагранжа II роду використовувалось у сукупності з методом матриць 4-го порядку [20]. Цей метод отримав застосування також для автоматизованого аналізу просторових механізмів і маніпуляторів. Принципи Даламбера і Даламбера-Лагранжа для автоматизованого формування рівнянь маніпуляторів використовувались в роботах [21] та інших авторів. В цьому випадку легко враховувати інерційність ланок як основного, так і передаточного механізму.

В роботі [16] показано достатньо значний вплив на динаміку маніпуляторів інерційності ланок приводів які обертаються і запропоновано метод врахування їх інерції. Ефективністю цього методу є простота формування рівнянь руху маніпулятора, яке зводиться до скалярного множення векторів моментів і сил інерції на вектори можливих переміщень точок і тіл. Метод не вимагає складання і диференціювання виразів кінетичної енергії ланок механізму.

Значне розповсюдження отримав метод формування динамічної моделі маніпулятора, побудований на основі рівнянь Ньютона-Ейлера [22]. В цьому методі для кожної ланки використовуються два рівняння руху твердого тіла з врахуванням реакцій зв'язків: рівняння руху центра мас як матеріальної точки і динамічного рівняння Ейлера обертання навколо центру мас. При цьому трудосмість розв'язку прямої задачі динаміки для маніпулятора пропорційна числу ланок.

Алгоритми аналізу динаміки на основі принципу Гауса і рівнянь Аппеля приведені в роботах [23, 2, 24]. В них для розрахунку узагальнених пришвидшень використовуються пряма мінімізація функції Гіббса на основі принципу найменшого змушення Гауса. Для незамкнутого кінематичного ланцюга А.Ф.Верещагіну вдалось побудувати алгоритм з лінійною залежністю числа операцій від числа ланок. До недоліків алгоритмів, побудованих на основі рівнянь Аппеля, слід віднести необхідність розрахунку функції енергії пришвидшення і її диференціювання. Загальні теореми динаміки системи (теорема про рух центру мас, та зміну кінетичного моменту) – використані в роботі [3] для моделювання динаміки. Ці методи застосовувались, в основному, для простих незамкнутих кінематичних ланцюгів.

Виконавчі механізми роботів, як правило, представляють собою замкнуті кінематичні контури. В цьому випадку для автоматизованого топологічного аналізу механізмів використовують методи теорії графів [25].

Експериментальні дослідження динаміки маніпуляційних систем приведені в роботах [26, 27], в яких визначаються динамічні навантаження, діючі в ланках маніпулятора, і точність відстеження робочим органом маніпулятора заданої траєкторії.

В роботі [28] складені рівняння руху ланок маніпуляторів, які потім були дослідженні на ЕОМ. При цьому використовувались моделі, аналогічні зазначеним раніше. Цікавим напрямком в дослідженні динаміки механізмів, які відносяться до класу шарнірно-зчленованих систем, є спроби автоматизувати його за допомогою ЕОМ [29, 30]. Це значно полегшило б працю обчислювачів і проектувальників. При розв'язку оберненої задачі про положення маніпулятора самим ефективним є векторний метод. Останнім часом в динаміці маніпуляторів з'явився новий клас задач – обернені задачі динаміки. Під оберненими задачами динаміки маніпуляторів розуміють задачі визначення сил і параметрів руху по заданим умовам руху [31].

Висновки. На основі вивчення наявних публікацій, які досліджують динаміку стрілових гідрокранів, маніпуляторів можна сформулювати основні напрямки досліджень (рисунки 1). В цих дослідженнях вирішуються дві головні задачі:

- 1) визначення динамічних навантажень, які виникають в ланках механізму;
- 2) підвищення точності відстеження робочим органом заданої траєкторії.



Рис. 1. Основні напрямки досліджень стрілових кранів та маніпуляторів

Перша задача вирішувалась шляхом складання диференціальних рівнянь руху, які потім досліджувались різнорізними методами. Друга задача вирішувалась, в основному, геометричним або алгебраїчним методами.

В той же ж час проведені дослідження не завжди задовольняють проектувальників, оскільки розглянуті методики не дозволяють створити механізм, який би забезпечував надійність експлуатації вже на етапі проектування.

Таким чином, аналіз наявних досліджень динаміки основних представників шарнірно-зчленованих систем показує, що їх динаміка вивчена недостатньо, а вимоги господарства обумовлюють необхідність подальшого їх дослідження.

Необхідність глибокого і детального дослідження динаміки стрілових гідрокранів, маніпуляторів і інших аналогічних машин, які відносяться до класу шарнірно-зчленованих систем, не один раз відмічалась в ряді робіт [32, 33, 34], присвяченій цій проблемі.

До головних недоліків розглянутих досліджень можна віднести:

- 1) відсутність загальних постановок задач динаміки всього класу шарнірно-зчленованих систем; наявні лише постановки для конкретних представників цього класу, що виключає перенесення результатів їх досліджень на механізми аналогічної структури;
- 2) автори цих робіт розглядають ланки механізмів допускаючи, що вони абсолютно жорсткі і мають постійні січення по всій довжині;
- 3) з розрахункових схем конкретних механізмів в більшості випадків виключені інерційні і пружні параметри проміжних ланок;
- 4) відсутні системи програм, що автоматизують процеси дослідження і динамічні розрахунки на етапі проєктування механізмів даного класу.

Тому відсутність загальної методики дослідження класу шарнірно-зчленованих систем, а також недостатнє вивчення динаміки одного з представників цього класу – стрілового гідрокрана визначили наступні задачі дослідження:

- розробити методику дослідження динаміки шарнірно - зчленованих систем загального виду з пружними і жорсткими ланками;
- розробити методику автоматизованого розрахунку шарнірно - зчленованих систем з використанням ЕОМ і на її основі створити систему програм для динамічних розрахунків;
- на основі розроблених методик вивчити динаміку стрілового гідрокрана евакуатора;
- експериментально перевірити результати досліджень на стріловому гідрокрані евакуатора.

При вирішенні поставлених задач, покладаючись на властивості реальних механізмів, які відносяться до класу шарнірно-зчленованих систем, і аналізі наявних публікацій з дослідження таких механізмів, були прийняті наступні припущення:

1. Рух ланок шарнірно-зчленованих систем розглядаються тільки в вертикальній площині.

2. Для шарнірно-зчленованих систем з невеликими відносними швидкостями повороту ланок, можна прийняти момент сил опору в шарнірах лінійно залежним від відносної швидкості.

Прийняті припущення дозволяють все різноманіття механізмів досліджуваного класу привести до розрахункової схеми, яка представляє собою плоску систему з пружними ланками довільного січення по довжині.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
2. Шахнипур М. Курс робототехники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527с.
3. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. – М., 1985.
4. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник. – М., 1983.
5. Рапопорт Г.Н., Солин Ю.В. Применение промышленных роботов. – М., 1985.
6. Воробьев Е.И. Анализ кинематики пространственных исполнительных механизмов манипуляторов методом матриц // Механика машин. – 1970. – Вып. 28-30. – С. 30-37.
7. R. Featherstone, "A Divide-and-Conquer Articulated-Body Algorithm for Parallel $O(\log(n))$ Calculation of Rigid-Body Dynamics. Part 1: Basic Algorithm," *Int. J. Robotics Research*, vol. 18, no. 9, pp. 867-875, 1999.
8. R. Featherstone, D. Orin, *Robot Dynamics: Equations and Algorithms*, *Proceedings of the 2000*

- IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000.
9. Pshikhov V. Kh. New Approach to the Design of the Near Time Optimal Path Following Controller for the Manipulating Robots. Proceedings CD (without pages numbers, 6 pages) and Abstracts Book (473 p., p. 353) of Int. Conf. «Mathematical Theory of Network and Systems», Perpignian, France, June 19-23, 2000.
 10. Jain, G. Rodriguez, Computational Robot Dynamics Using Spatial Operators, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000.
 11. Гераун В.М. Изыскание и исследование навесного погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом. Автореф. канд. дис. – Волгоград, 1979.– 22с.
 12. Черноусько Ф.Л. Динамика управляемых движений упругого манипулятора // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. –1981. – № 5. – С. 142-152.
 13. Слуде П.Б. Конструкции, кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов. – М.: ЦНТО им.С.И.Вавилова. –1986. –59с.
 14. Кобринский А.А. Податливость манипуляторов. „Докл. АН СССР”. –1978.– Т.238.– № 5.– С.1071-1074.
 15. Кожевников С.Н., Долгов Н.М. Динамические деформации в звеньях механизмов на неустановившихся режимах работы. – В кн.: Механика машин. Вып.19-20. – М.: Наука.– С. 141-151.
 16. Овакимов А.Г. Задача о движении пространственных механизмов с несколькими степенями свободы и ее решение. – „Машиноведение”, 1970.– № 2.– С.17-24.
 17. Аветиков Б.Г., Корытко О.Б., Юдин В.И. Расчет колебаний консоли перемещающегося робота. – В кн.: Робототехника. – Л.: Машиностроение, 1977. – С.73-80.
 18. Гуляев В.И., Завражина Т.В. Динамическое управление плоскими движениями упругого двузвенного космического робота-манипулятора // Проблемы управления и информатики.– 1998.– С. 140-156
 19. Кулаков Ф.М. Супервизорное управление манипуляторами роботами. – М., 1980.
 20. Уикер И. Динамика пространственных механизмов // Конструирование и технология машиностроения. – М., 1969. – № 1. – С. 264-278.
 21. Корнеев И.Г. Система с переменной структурой для управления манипуляционными роботами в пространстве внешних координат. В сб. трудов научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Под научной ред. проф. Е.И. Юревича. СПб, 2002.– С. 281-288.
 22. Luh J. Y. S. Walker M. W., Paul R. P. C. Online computational scheme for mechanical manipulators // Trans. ASME. J. Dyn. Syst, Meas, and Contr. –1980. 102. – No. 2.– P. 69-76.
 23. Верецагин А.Ф. Принцип наименьшего принуждения Гаусса для моделирования на ЭВМ динамики роботов-манипуляторов // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220. Вып. № 1 С.51-53
 24. Lilov L., Loren M. Dynamic Analysis of Multirigid – Body Sestem Based on the Gauss Principle // ZAMM. –1982. 62. No. 11. – P. 539-545.
 25. Виттенбург И.С. Динамика систем твердых тел. – М., 1980.
 26. Карклиныш А.К., Райнес Я.К. Моделирование на ЭЦВМ и экспериментальное исследование промышленных роботов с пневмоприводом. – В кн.: Экспериментальные исследования и диагностирование роботов. – М.: Наука, 1981– 1984 с.
 27. Нахапетян Е.Г. Экспериментальное исследование динамики механизмов промышленных роботов. – В кн.: Механика машин. Вып.53. – М.. Наука, 1978. – С.110-122.
 28. Соколов А.В. Исследование условий асимптотической устойчивости движения управляемого электромеханического манипулятора / Проблемы механики и процессов управления. Меж. вуз. сб. науч. тр. – Пермь, 2004. – Вып. 36.- С. 212.
 29. Малиновский Е.Ю. Автоматизированная система динамического анализа механизмов.- „Машиноведение”. –1981, № 1. – С.7-11.
 30. Цветкова О.Л. Оптимизация геометрических параметров кинематической структуры

штукатурного робота [Текст] / О.Л. Цветкова // *Электротехника и автоматика в строительстве и на транспорте: межвуз. сб./ РГСУ.* – Ростов н/Д, 2005. – 107 с. – С.9-15.

31. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. К решению в явном виде обратной задачи о положениях манипуляторов с шестью степенями подвижности // *Машиноведение.*–1986. – № 3. – С.10-21.

32. Анимица А.В., Рафиков Г.Ш. Синтез алгоритма управления свапочным промышленным роботом. *Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 118:* - Донецьк: ДонДТУ, ТОВ "Лебідь", 2007.- С. 142-145.

33. Зубов В.И. Проблема устойчивости процессов управления. СПб.– СПбГУ, 2001. – 354 с.

34. В.А.Карташев, Оптимизация транспортных перемещений сборочного робота. В сб. *Технология, Сер. Гибкие производственные системы и робототехника, Вып. 3-4.*– М., ВНИИМИ,1993.

УДК 614.84:665.6/7

П.І. Топільницький, к.т.н., доцент, В.В. Романчук (Національний університет "Львівська політехніка")

ПРОБЛЕМИ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ОБ'ЄКТАХ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Розглянуті проблеми техногенної безпеки нафто- та газопереробних підприємств України

Постановка проблеми. Розвиток нафтопереробної та нафтохімічної промисловості, висока енергонасиченість підприємств супроводжується зростанням кількості пожеж та об'ємних вогняних вибухів паливно-повітряних сумішей (ППС). Зростають і масштаби катастроф. Тому збільшуються збитки, які наносяться зі сторони відповідних підприємств, населенню, природному середовищу. Це означає, що підвищення пожежовибухобезпеки (ПВБ) нафтопереробних та нафтохімічних комплексів є важливою складовою забезпечення захищеності населення від загроз техногенного та екологічного характеру.

Щорічно у світі на нафтопереробних підприємствах відбувається до 1500 аварій, 4 % яких пов'язані з масовою загибеллю людей; матеріальні збитки в середньому становлять понад 100 млн дол. США на рік. Аварійність підприємств безперервно зростає. Так, в США за тридцять років число аварій в нафтопереробній промисловості збільшилось втричі, кількість людських жертв – майже в 6 разів, матеріальні збитки – в 11 разів.

Основну небезпеку для промислової території об'єктів нафтопереробки становлять аварійна загазованість, пожежі та вибухи. З них пожежі складають 58,5 % від загальної кількості небезпечних ситуацій; загазованість – 17,9 %; вибухи – 15,1 %; інші небезпечні ситуації – 8,5 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Головною особливістю підприємств з переробки вуглеводневої сировини є наявність потоків пожежовибухонебезпечних продуктів та сировини, які створюють небезпеку виникнення великих аварій. Для оцінки пожежовибухонебезпечки технологічних установок потрібен статистичний аналіз крупних аварій, пожеж та вибухів, які виникли на небезпечних підприємствах. Відмітимо, що не зважаючи на вдосконалення систем ПВБ, кількість аварій постійно зростає. В табл. 1 наведені статистичні дані по крупних аваріях в нафтопереробній та нафтохімічній