

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МАНІПУЛЯТОРА ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ЦЕХУ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА НА ОСНОВІ МЕТОДУ ЛАГРАНЖА-ЕЙЛЕРА

Ощипок І.М., д.т.н., професор
Львівська комерційна академія, м. Львів

У статті наводиться класифікація маніпуляторів рекомендованих для застосування в заготівельних цехах ресторанного господарства. Отримані рівняння у зручній векторно-матричній формі для визначення кінетичної і потенціальної енергій маніпулятора, і аналітичних досліджень.

The article provides a classification of manipulators recommended for use in purveying shop restaurant. The equations in a convenient vector-matrix form to determine the kinetic and potential energies of the manipulator, and analytical studies.

Ключові слова: маніпулятор, цех, заготівельний, ресторан, енергія, кінетична, потенціальна.

Постановка проблеми. Розробка і впровадження маніпуляторів дає технічні, економічні і соціальні вигоди [1, 6, 7, 8, 9]. Зараз у заготівельних цехах ресторанного господарства є значна кількість робочих місць, де необхідно замінити працівників, які виконують важкі і монотонні операції, машинами. Досягти потрібних результатів можна впровадженням маніпуляторів. Повний опис руху маніпулятора отримують, використовуючи метод Лагранжа-Ейлера для неконсервативних систем. Описуючи кінематику маніпулятора, за допомогою матричного подання Денавіта-Хартенберга [11, 12], і користуючись Лагранжем-Ейлером, отримуємо рівняння динаміки маніпулятора. Таке сумісне використання подання Денавіта-Хартенберга та методу Лагранжа приводить до компактної векторно-матричної форми.

Аналіз останніх досліджень. В роботах [2, 3, 4, 5, 6] Дьяченко О.В., Тимофєєва О.Н., Жавнера В.Л., Павлова Г.В. досліджені задачі проектування і застосування роботизованих технологічних комплексів для механізації і автоматизації ручних і допоміжних операцій м'ясної промисловості. Жалнерович С.А., Маршак Л.С. навів функціональну структуру і організацію розробок комплексно-автоматизованих систем з використанням роботів. Проте, дослідження маніпуляторів для потреб ресторанного господарства до тепер не вивчали. Рівняння руху маніпулятора отримані Лагранжем-Ейлером забезпечують простоту і єдиний підхід у розв'язанні задач динаміки маніпулятора. В рамках припущення про те, що ланки являють собою тверді тіла, цей підхід приводить до системи нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Б'єщі [10], користуючись описом кінематичного ланцюга матриць перетворень однорідних координат і рівняннями Лагранжа-Ейлера, показав, що рівняння динаміки руху стенфордського шести-ланкового маніпулятора істотно нелінійні і відображають ефекти, зв'язані з дією сил інерції, обумовлених прискореннями руху ланок, дією коріолісових і відцентрових сил, а також дією сили тяжіння. Більше того, діючі в з'єднаннях сили і моменти залежать від параметрів маніпулятора, миттєвих значень приєднаних змінних, швидкостей і прискорень, а також від вантажу, який переносить маніпулятор. Рівняння Лагранжа-Ейлера забезпечують строгий опис динаміки стану маніпулятора і можуть використовуватись для розробки удосконалених законів керування в просторі приєднаних змінних. Менше вони використовуються для розв'язку прямої і зворотної задачі динаміки.

Мета статті. Подати математичний опис рівнянь руху маніпулятора для аналітичних досліджень його динаміки у зручній векторно-матричній формі заготівельних цехів ресторанного господарства.

Виклад основного матеріалу. Траєкторії руху в просторі захоплювального пристрою маніпулятора під час виконання технологічних операцій поділимо на три види:

Операції, при яких основні робочі рухи здійснюються в одній чи декількох площинах, розміщених під кутом одна до одної, найчастіше кратним 90° .

Операції, при яких траєкторії перенесення вантажу є відрізками вертикальних чи горизонтальних прямих ліній. Це завантаження конвеєрних ліній та їх розвантаження, тощо. Зазначимо, що робочі операції, пов'язані з завантаженням, розвантаженням можуть розглядатися як робочі операції з перешкодами.

Операції, для яких необхідно планувати траєкторії руху. Ці траєкторії розраховують методами інтерполяції і (або) апроксимації за допомогою поліномів деякого класу, а також будують послідовності окремих точок для керування маніпулятором під час руху з початкового положення в кінцеве. Це обслуговування технологічного обладнання, рухи робочих органів машин для заготівельних цехів та інші.

Можливість аналітичного програмування з високою точністю відтворення програми необхідна і у випадку використання автоматизації з застосуванням маніпуляційних систем (МС) у гнучких автоматизованих системах, де функції зміни програми роботи машин лежать на керуючих системах більш високого рівня. Наведемо класифікацію маніпуляторів заготівельних цехів ресторанного господарства.

Класифікація маніпуляторів заготівельних цехів ресторанного господарства

Маніпулятори			
За видом керування			
З ручним керуванням		З адаптивним керуванням	З програмним керуванням
За мобільністю			
стаціонарні		пересувні	
За характером виконуваних операцій			
технологічні	універсальні		допоміжні
За способом установки			
Встановлені на підлозі	на підвісі	вбудовані	
За числом ступенів рухомості			
З двома ступенями рухомості	З трьома ступенями рухомості	З чотирма ступенями рухомості	З ступенями рухомості більше чотирьох
За видом приводу			
електромеханічні	гідравлічні	пневматичні	Комбіновані
За вантажопідйомністю			
Легкі (до 10 кг)	Середні (до 200 кг)	Важкі (до 1000 кг)	
За точністю позиціонування			
Грубі до 10 мм		Точні до 1 мм	
За довжиною робочої зони обробки			
До 0,5 м	До 1 м	Більше 1 м	

Виведення рівняння динаміки руху маніпулятора, на використанні рівняння Лагранжа-Ейлера, ґрунтується на описі взаємного просторового розміщення систем координат i -ї і $(i-1)$ -ї ланки за допомогою матриць перетворень однорідних координат A_i . Ця матриця перетворює координати довільної точки відносно i -ї системи координат в координати цієї ж точки відносно $(i-1)$ -ї системи координат.

$$\frac{d}{dt} = \left[\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right] - \frac{\delta L}{\delta q_i} = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

- де L – функція Лагранжа ($L=K-P$);
- K – повна кінетична енергія маніпулятора;
- P – повна потенціальна енергія;
- q_i – узагальнені координати маніпулятора;
- \dot{q}_i – перша похідна по часу узагальнених координат;

τ_i – узагальнені сили (або моменти), які виникають в i -му з’єднанні для реалізації заданого руху i -ї ланки.

Для того щоб скористатися рівнянням Лагранжа-Ейлера, необхідно вибрати систему узагальнених координат. Існують різні системи узагальнених координат, придатні для опису простого маніпулятора з обертовими і поступальними парами. Оскільки кути поворотів у з’єднаннях безпосередньо доступні вимірюванню за допомогою давачів чи потенціометрів, то вони складають найбільш природну систему узагальнених координат. В цьому випадку узагальнені координати збігаються з приєднаними змінними координатами маніпулятора. Зокрема, якщо i -а пара-обертальна, то $q_i \equiv Q_i$, якщо ж i -та пара поступальна, то $q_i \equiv d_i$.

Знаючи швидкість довільної точки кожної ланки маніпулятора, визначаємо кінетичну енергію i -ї ланки. Позначимо через K_i кінетичну енергію i -ї ланки ($i=1, 2, \dots, n$). dK_i позначає кінетичну енергію елемента маси dm i -ї ланки. Тоді

$$dK_i = \frac{1}{2} (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) dm \text{ слід } (U_i U_i^T) dm = \frac{1}{2} T_r (U_i U_i^T) dm. \quad (2)$$

де \dot{x}_i^2 - швидкість руху i -ї ланки в напрямку осі X , м/с; \dot{y}_i^2 - швидкість руху i -ї ланки в напрямку осі Y , м/с; \dot{z}_i^2 - швидкість руху i -ї ланки в напрямку осі Z , м/с; Тут замість скалярного добутку використовується позначення T_r (слід матриці), що дозволяє перейти до матриці інерції J_i -ї ланки.

Підставляючи у вираз (2), значення швидкості відносно базової системи координат (3)

$$U_i = \frac{d}{dt}({}^0r_i) = \frac{d}{dt}({}^0A_i^T r_i) = \left[\sum_{j=1}^i \frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right]^T r_i, \quad (3)$$

де 0A_i – матриця, яка визначає зв'язок між системою координат i -ї ланки і базової системи координат; 0r_i – координати цієї ж точки відносно базової системи координат; ${}^i r_i$ – координати довільної точки нерухомої відносно i -ї ланки.

Для спрощення формул введемо позначення $U_{ij} = \frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j}$, тоді:

$$U_{ij} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} Q_j^{j-1} A_i & , \text{ якщо } j \leq i \\ 0 & , \text{ якщо } j > i \end{cases} \quad (4)$$

Використовуючи це позначення, формулу (3) можна подати у формі

$$U_i = \left[\sum_j U_{ij} \dot{q}_j \right]^T r_i. \quad (5)$$

Підставляючи у вираз (2) значення U_i з рівняння (5), отримаємо наступний вираз для кінетичної енергії елемента масою dm :

$$dK_i = \frac{1}{2} T_r \left[\sum_{p=1}^i U_{ip} \dot{q}_p r_i \left[\sum_{r=1}^i U_{ir} \dot{q}_r r_i \right]^T \right] dm = \frac{1}{2} T_r \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} ({}^i r_i dm {}^i r_i^T) U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right]. \quad (6)$$

Матриця U_{ij} характеризує зміну положень точки i -ї ланки відносно базової системи координат, обумовлену зміною координат q_i . Дана матриця однакова для всіх точок i -ї ланки і не залежить від розподілу маси в цій ланці. Не залежить від розподілу маси також величина \dot{q} . Таким чином,

$$K_i = \int dK_i = \frac{1}{2} T_r \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} \left(\int {}^i r_i {}^i r_i^T dm \right) U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right] \quad (7)$$

Інтегральний член в дужках є матрицею інерції J_i -ї ланки:

$$J_i = \int {}^i r_i {}^i r_i^T dm = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i x_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix} \quad (8)$$

Якщо скористатися тензором інерції I_{ij} , за визначенням, рівним

$$I_{ij} = \int \left[\delta_{ij} \left[\sum_k x_k^2 \right] - x_i x_j \right] dm, \quad (9)$$

де: індекси i, j, k приймають значення x_i, y_i чи z_i , позначаючи осі i -ї системи координат, а δ_j – так званий символ Кронекера, то матрицю J_i можна представити в наступній формі:

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & - \\ I_{xy} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & m_i \bar{y}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де ${}^i \bar{r}_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T$ – однорідні координати центра мас i -ої ланки в i -ій системі координат. Формулу (5.10) можна записати у вигляді:

$$J_i = m_i \begin{bmatrix} \frac{-R_{i11}^2 + R_{i22}^2 + R_{i33}^2}{2} & R_{i12}^2 & R_{i13}^2 & - \\ R_{i12}^2 & \frac{R_{i11}^2 - R_{i22}^2 + R_{i33}^2}{2} & R_{i23}^2 & x_i \\ R_{i13}^2 & R_{i23}^2 & \frac{R_{i11}^2 + R_{i22}^2 - R_{i33}^2}{2} & y_i \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $R_{ijk} = \frac{I_{ijk}}{m_i}$; $i, j, k = 1, 2, 3$.

Таким чином, повна кінетична енергія маніпулятора дорівнює:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n T_r \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} J_i U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i \left[T_r (U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r \right] \quad (12)$$

Зауважимо, що величини $J_i (i=1, 2, \dots, n)$ залежать тільки від розподілу маси i -ї ланки в i -ій системі координат і не залежать ні від положення, ні від швидкості ланок. Це дозволяє один раз обчислити матриці J_i та використовувати отримані дані в подальшому для обчислень кінетичної енергії маніпулятора.

Позначимо повну потенціальну енергію маніпулятора через P , а потенціальну енергію i -ї ланки через P_i .

Тоді

$$P_i = -m_i g {}^0 \bar{r}_i = -m_i g ({}^0 A_i {}^i \bar{r}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

Сумуючи потенціальну енергію всіх ланок, отримуємо:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n -m_i g ({}^0 A_i {}^i \bar{r}_i) \quad (14)$$

де $g = (g_x, g_y, g_z, 0)$ – вектор-рядок, який описує гравітаційне прискорення в базовій системі координат.

В земній системі координат $g = (0, 0, -|g|, 0)$ і дорівнює $9,8062 \text{ м/с}^2$.

Висновок

Отримані у статті рівняння, у зручній векторно-матричній формі, слід використовувати для розробки, проектування і дослідження маніпуляторів призначених для роботи в заготівельних цехах ресторанного господарства. Вони дозволяють моделювати їх роботу і проводити аналітичні дослідження нових маніпуляторів, які будуть розроблятися.

Література

1. Большаков О.В. Техническое перевооружение предприятий мясной промышленности. – М.: АгроНИИТЭ Имясомолпром, 1990. – 29с.
2. Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Некоторые вопросы проектирования роботизированных технологических комплексов. – Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1981. – 64 с.
3. Жавнер В.Л. Применение промышленных роботов и манипуляторов для механизации и автоматизации ручных и вспомогательных операций в мясной промышленности //Обзорная информация /ЦНИИТЭИММП. – М., 1984. – С.13-20.

4. Жавнер В.Л., Павлова Г.В. Тенденции механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных работ с помощью промышленных роботов и манипуляторов в мясной промышленности. Обзорная информация. – М.: АгроНИИТЭИмясомолпром, 1989. – 36 с.
5. Жалнерович Е.А., Маршак Л.Е. Функциональная структура и организация разработок комплексно-автоматизированных систем, использующих промышленных роботов. – Минск: БелНИИНТИ, 1980. – 82 с.
6. Лемперт Л.П., Михайлов Л.М. Автоматизация производственных процессов в мясной промышленности. – М.: Пищ. пром-сть, 1977. – 155 с.
7. Леонтьев В.И. Оборудование мясной промышленности за рубежом М.: –1970. –70с.
8. Ощипок І.М. Про застосування промислових роботів і маніпуляторів на технологічних операціях харчових підприємств. //Сільський господар. – № 5-6,1998. – С.10–11.
9. Ощипок І.М., Береза І.Г. Застосування роботів в технологічних процесах переробки м'яса і молока. SIET-10. //Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини /Вип. 10. – К., 2001. – С.175-179.
10. Bejczy A.K. Robot Arm Dynamics and Control Technical Memo 33-669 Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., 1974.
11. Kane T.R. Levinson D.A. The use of Kane's dynamical equations in robotics // The Intern. Journ. of robotics research, 1983. V.2, № 3. – P.52-56.
12. Lee C.S., G., Lee B.H., Nigam R. Development of the Generalized d'Alambert Equations of Motion for Mechanical Manipulators. Proc. 2nd Conf. Decision and Control. San Antonio, Tex., 1983. – P.1205-1210.

УДК.664.64.014.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМЕСА ТЕСТА В СОВРЕМЕННЫХ ТЕСТОМЕСИЛЬНЫХ МАШИНАХ

**Янаков В.П., канд. техн. наук, старший преподаватель,
Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь**

Аннотация – определены направления совершенствования тестомесильного оборудования хлебопекарного производства и процессов перемешивания при замесе теста. Предложены пути модернизации современного тестомесильного оборудования в ориентации на оптимизацию энергетического воздействия при контроле качественных показателей изменения теста.

Annotation - identified directions to improve dough mixing equipment at baking production lines and directions to improve dough mixing process. We intended to offer solutions to modernize dough mixing equipment focusing on energy efficiency through controlling quality of dough mixing indicators.

Ключевые слова: процесс, оборудование, производство, исследование, моделирование, оптимизация, энергоэффективность.

Постановка проблемы. Исследованиями кафедры оборудования пищевых и перерабатывающих производств ТГАТУ эффективности процессов перемешивания хлебопекарного теста (ЭППХТ) тестомесильных машин была установлена, низкая результативность, широкое варьирование достигаемых качественных показателей замеса теста современных тестомесильных машин [1,2]. Данные отклонения контролируемых параметров наблюдаются у большинства современных тестомесильных машин: ТММ-1М, МТМ-15, МБТМ-140, Прима-300, Г7-ТЗМ-63 и др. Независимо от технологического назначения, используемого сырья, их объединяет одинаковая кинематическая схема: электродвигатель, клиноременная передача, блок управления, месильный орган. Величина диапазона изменения рецептурных и технологических норм устанавливается, при работе оборудования с продуктом. В качестве (ЭППХТ) тестомесильных машин были приняты:

1. N_{max} максимальная затрачиваемая мощность;
2. τ время замеса теста;
3. A совершаемая работа за данный период;
4. ρ_T равномерность замешенного теста;
5. t_K температура нагрева теста в конце технологической операции.