УДК 621.87

EFFICIENT USE OF ENERGY RESOURCES IN MECHATRONIC MODULE OF PACKING MACHINES

V. Iakymchuk, O. Gavva
National University of Food Technologies

Key words:
Mechatronic module
Energy resource
Packaging

Article history:
Received 03.09.2019
Received in revised form 19.09.2019
Accepted 03.10.2019

Corresponding author:
O. Gavva
E-mail:
Gavvaoleksandr@gmail.com

ABSTRACT

The paper deals with the direction of control of the mechatronic systems operation, which is poorly researched and almost not realized about correction of the energy resource of the system. The authors propose a technique for implementing the energy efficiency management of a mechatronic packaging module system, which based on the classical principle of least action, according to which movement of working bodies is ensured. It is envisaged that the control system will be able to estimate the possible trajectories of movement of the working bodies by analyzing the energy costs of the mechatronic packaging system.

For the realization of this task in mathematical model an additional vector of energy control was added, the value of which significantly influences the calculation of the characteristic of the control output. It has been proposed to estimate the energy costs of a mechatronic packaging system by analyzing the integral energy characteristics obtained during the technological cycle of packaging, taking into account consumed energy. The main components of such coefficient are the performance indicators of the active energy of the mechatronic packaging system, the efficiency of the use of the active energy of the mechatronic packaging system and the efficiency of the conversion of electrical energy.

To verify the adequacy of the obtained analytical results, it was made an experimental setup of a functional mechatronic module of linear movement of structural units of group packaging. The results of analytical studies of energy consumption are presented in the form of graphs of energy consumption (total and reactive) during the implementation of the optimal law of movement of a number of consumer packages. A variable external factor for determining the quality of consumption by the mechatronic module of the energy resource was the angle of inclination of the generating plane. The above mathematical model of mechatronic packaging system allows to determine the main ways of increasing the efficiency of its energy resource taking into account structural features of the structure by: determining the quality of the control system of mechatronic packaging systems by the criterion of efficient use of electricity; development of methods for diagnosing and recovering energy resources of mechatronic packaging systems.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-7

ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ В МЕХАТРОННИХ МОДУЛЯХ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН

В. М. Якимчук, О. М. Гавва
Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто малодосліджений і майже нереалізований напрям керування роботою мехатронних систем — корегування енергетичного ресурсу системи. Запропоновано методику реалізації управління енергетичною ефективністю мехатронної системи модулів пакування, яка ґрунтується на класичному принципі найменшої дії, згідно з яким забезпечується рух робочих органів. Передбачається, що система керування зможе оцінювати можливі траєкторії руху робочих органів шляхом аналізу енергетичних витрат мехатронної системи пакування.

Для реалізації поставленої задачі в математичну модель керування модулем мехатронної системи пакування додано додатковий вектор керування енергетичним ресурсом, величина якого суттєво впливає на розрахунок характеристики вихідного сигналу керування. Запропоновано оцінювати енергетичні витрати мехатронної системи пакування шляхом аналізу інтегральних енергетичних характеристик, отриманих за час технологічного циклу пакування з урахуванням спожитої енергії, ефективності використання повної енергії. Основними складовими коефіцієнта є показники ефективності використання активної енергії мехатронної системи пакування та ефективності перетворення електричної енергії.

Для перевірки адекватності отриманих аналітичних результатів виготовлено експериментальну установку функціонального мехатронного модуля лінійного переміщення структурних одиниць групової упаковки. Результати аналітичних досліджень витрат енергії представлені у вигляді графіків витрати енергії (загальної та реактивної) під час реалізації оптимального закону переміщення ряду споживчих упаковок. Змінним зовнішнім фактором для визначення якості споживання мехатронним модулем енергетичного ресурсу був кут нахилу твірної площини. Наведена математична модель мехатронної системи пакування дає змогу визначити основні способи підвищення ефективності використання її енергетичного ресурсу з урахуванням структурних особливостей конструкції шляхом визначення якості системи керування мехатронними системами пакування за критерієм ефективного використання електроенергії та розробки способів діагностування й рекуперації енергетичних ресурсів мехатронних систем пакування.

Ключові слова: *мехатронний модуль, енергетичний ресурс, пакування.*

Постановка проблеми. Сучасні мехатронні системи пакувального обладнання є складними динамічними об’єктами, що характеризуються великою кількістю зовнішніх і внутрішніх зворотних зв’язків, нелінійністю та неста-

ціонарністю системи керування, хаотичними змінами зовнішніх впливів і навантажень.

Одним із завдань при проектуванні мехатронних систем пакування є визначення та аналіз критеріїв їх ефективності, які формуються залежно від завдань і функцій мехатронних модулів технологічного об'єкта.

Традиційно, якість управління мехатронними системами визначаються комплексом показників. Серед основних — показник ефективного використанням електричної енергії [1; 2], який характеризується такими факторами: якістю проектних рішень (вибором структури, схеми й технічних засобів керування); врахуванням динамічних режимів експлуатації та відповідного налаштування регуляторів; вибору законів зміни керуючих і збурюючих впливів.

Створення новітнього пакувального обладнання на основі мехатронних систем передбачає забезпечення саме таких вимог для ефективного використання електричної енергії під час його проектування. Однак використати єдиний концептуальний підхід до визначення критеріїв енергоефективності мехатронних систем пакування досить складно через особливості їх специфіки, яка потребує врахування впливу функціональних і конструктивних особливостей їхніх структур для кожного окремого випадку [3].

Аналіз конструкцій вітчизняних і зарубіжних мехатронних модулів пакування машин показав, що подальший їх розвиток можливий на базі використання слідкуючих приводів. Під терміном слідкуючий привод [4] розуміють привод із керуванням руху веденої ланки через зворотний зв'язок, який дає можливість точно реалізовувати параметри операцій пакування. Саме наявність у системі керування зворотних зв'язків робить слідкуючі приводи широкофункціональними пристроями, які здатні забезпечити високу точність реалізації заданих параметрів руху та позиціювання. Принцип дії таких систем полягає у безперервному порівнянні заданих кінематичних і динамічних параметрів роботи з дійсним їх значенням. Сьогодні виробники таких приводів пропонують сервосистеми з пневматичним, гідравлічним та електричним приводом.

Типову структурну схему мехатронного модуля для забезпечення обертального руху робочих органів на основі застосування сервоелектродвигунів наведено на рис. 1.

Слід зазначити, що належність сучасних мехатронних систем пакування до класу складних динамічних об'єктів вимагає спеціального аналізу особливостей процесів управління, передусім взаємодії енергетичного та інформаційного ресурсів. На шляху перетворення електричної енергії в механічну відбуваються три основні фізичні процеси: перетворення електричної енергії в механічну (і навпаки); накопичення електричної і механічної енергії в елементах, що мають властивості акумуляторів; дисипація електричної і механічної енергії тощо. Це означає, що будь-яка мехатронна система модуля пакування має власний інформаційний ресурс, який повністю визначає характер процесів у системі, забезпечує її граничні можливості (обмеження) та енергетичну ефективність.

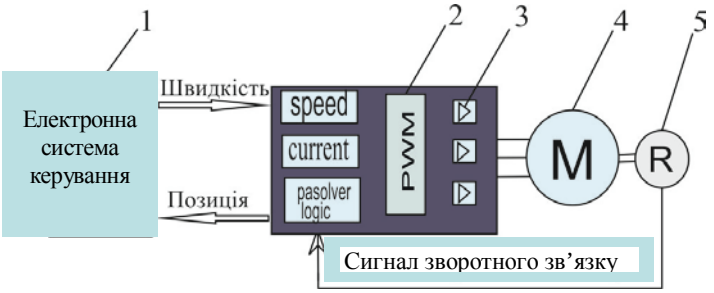

Рис. 1. Структурна схема приводу мехатронного модуля для забезпечення обертального руху робочих органів: 1 — мікропроцесорна система керування; 2 — підсилювач потужності; 3 — пристрій передачі інформації; 4 — датчик зворотного зв'язку

Наявність у структурі керуючих і слідкуючих пристроїв, що впливають на параметри системи і функціональні процеси, здатні легко змінювати інформаційний ресурс системи. Типовим прикладом таких змін є корегування циклограми роботи мехатронної системи, розширення властивостей, статичних і динамічних характеристик тощо.

Поряд із цим існує ще один можливий напрям корегування роботи мехатронних систем, який є малодослідженим і майже нереалізованим, — корегування енергетичного ресурсу системи. Принципова можливість управління енергетичною ефективністю мехатронної системи модулів пакування обумовлюється класичним принципом найменшої дії, згідно з яким забезпечується рух по оптимальній траєкторії, що відповідає мінімуму дії [5]:

$$S_{хв} = S_0 = \int_0^t L_0 dt, \tag{1}$$

де S_0 — траєкторія руху робочого органа мехатронної системи; L_0 — мінімум енерговитрат Лагранжа.

З формули (1) можна зробити основний висновок: мікропроцесорна система керування роботою мехатронним модулем пакування повинна містити додаткові засоби оцінки й аналізу критеріїв ефективного використання енергетичного ресурсу та мати вплив на виконавчу систему, що забезпечить рух робочого органа відповідно до оптимальної траєкторії. Це означає, що для підвищення ефективності використання енергетичного ресурсу потрібно розширити можливість інформаційного ресурсу системи керування мехатронним модулем пакування.

Мета дослідження: розробити математичну модель для оцінювання енергетичного ресурсу мехатронних системах пакування з урахуванням структурних особливостей взаємозв'язку енергетичних та інформаційних ресурсів.

Викладення основних результатів дослідження. Методика оцінки та керуванням енергетичним ресурсом мехатронного модуля передбачає розробку математичної моделі його керування.

Типову структуру керування модулем мехатронної системи пакування можна навести у вигляді [4]:

$$x^{\cdot}(t) = f[t, x(t), H(t,\tau), u_{\downarrow}1, (t-\tau_{\downarrow}1), u_{\downarrow}2(t-\tau_{\downarrow}2], \quad (2)$$

де $x = \{x_i\}$ — змінні фактори; $f(\cdot)$ — вектори-функцій корегування; $H(t,\tau)$ — функції зв'язку міжзмінними факторами; u_1 — характеристика системи керування, $u_1 = \{u_{1i}\}$; u_1 — характеристика зовнішніх впливів, $u_2 = \{u_{2i}\}$; τ_1, τ_2 — характеристика запізнень оброблення та подачі сигналів. Недоліком такої системи керування є відсутність контролю та впливу на енергетичний баланс мехатронного модуля.

Подальша модернізація системи керування передбачає створення цільової функції управлінням енергетичним ресурсом у структурі (2) і полягає в підтримці або підвищенні ефективності роботи системи, а саме:

$$E\left[x(t), f(\cdot), u_1(t), T\right] \geq E_0; \quad (3)$$

$$x\left[(t,T), u\right] \approx x_0(t,T), \quad (4)$$

де T — інтервал часу, протягом якого діє сигнал керування; $x_0(t,T)$ — функція оптимального закону руху.

Якщо рівняння (3) доповнити до алгоритму керування (1) мехатронним модулем пакування, то поряд з кінематичними та динамічними характеристиками роботи можна отримати миттєві значення зміни енергетичного ресурсу системи E на інтервалі T. Однак значення енергетичного ресурсу будуть мати похибку запізнення інформації, величина якої залежить від часу збирання інформації і передачі сигналів.

Скористаємося алгоритмом визначення величини похибки, який використовується в складних системах керування та введемо поняття умовної міри допустимої похибки, яка у нашому випадку буде мати прогнозоване значення оцінки ефективності Δ.

У такому випадку завданням підсистеми керування енергетичним ресурсом буде полягати у формування керуючого сигналу $u_1(t)$, який при заданих функціях керування енергетичним ресурсом враховує відхилення отриманих значень від реальних змінних на інтервалі T таким чином, що ефективність використання енергетичного ресурсу мехатронної системи $E(x)$ істотно не знижується і завжди знаходиться в межах заданої похибки:

$$\left|E\left[x(0,t)\right] - E\left[x_0(0,t)\right]\right| \leq \Delta. \quad (5)$$

Для реалізації умови (5) процес керування $u_1(t)$ пропонується здійснювати відомими способами, які мають різну природу його формування: адаптивну, синергетичну, програмну, обмежувальну [2—5]. Незалежно від способу формування керуючого сигналу, кінцевим результатом зміни енергетичного ресурсу в мехатронному модулі пакування є встановлення взаємозв'язку між керуючим сигналом $u_1(t)$ для виконавчого пристрою та його складовою підсистемою $u_2(t)$, яка формує оптимальну характеристику ба-

лансу [7]. Таким чином робота нової системи керування мехатронним модулем пакування описується нерівністю:

$$E\left[x(t),u_1(t),u_2(t),T\right]\geq E_0. \tag{6}$$

Другим домінуючим фактором в роботі системи керування мехатронних модулів пакування є постійний аналіз енергетичних процесів під час їх роботи. За термінологічним визначенням енергетичний ресурс мехатронної системи [5; 6] — це джерело електричної енергії, що забезпечує можливість функціонування системи за рахунок використання внутрішніх запасів або перетворення енергії будь-якого виду в електричну, а також засоби передачі енергії від джерела до споживача і перетворення її характеристик. Тобто будь-яка мехатронна система пакувального обладнання повинна забезпечувати ефективність виконання технологічної задачі пакування за рахунок оптимального використання енергії, одержаної від джерела живлення.

Традиційно ефективність використання енергетичного ресурсу в машинах пакування оцінювали співвідношенням між витратами механічної енергії руху систем пакування за заданими параметрами; електричної енергії, споживаної від джерела електроживлення, та енергії втрат у структурних елементах мехатронних систем. Кількісна оцінка ефективності використання енергетичного ресурсу в машинах пакування формувалась за допомогою [8]: коефіцієнта корисної дії (ККД), коефіцієнта потужності, коефіцієнтів спотворень k_c та несиметрії, узагальненого показника енергетичної ефективності H [5] тощо. Однак усі ці характеристики відображають лише перетворення активної енергії і не враховують додаткових втрат в процесах управління рухом, зокрема якості регулювання системи пакування, особливості перетворення спектрів струмів і напруг, перехідних характеристик в часі тощо.

Для аналізу системою керування кількісної оцінка ефективності використання енергетичного ресурсу мехатронного модуля пропонується визначати коефіцієнт інтегральних енергетичних характеристик, отриманих за час технологічного циклу пакування з урахуванням спожитої енергії.

Основними складовими такого коефіцієнта є показники:

- ефективності використання активної енергії мехатронної системи пакування:

$$k_{p.a}=\frac{E_M}{E_M+\Delta E_n+\left|\Delta E_{0M}\right|}, \tag{7}$$

де E_M — витрачена енергія мехатронної системи на виконання роботи пакування за час T; ΔE_n — сумарна енергія втрат в усіх елементах електромеханічної системи за час T; $\Delta E_0=\Delta E_M-E_{0M}$ — різниця між реальною й теоретичною (за ідеальних умов роботи) енергією мехатронної системи, витраченої на виконання роботи пакування.

З іншого боку, використання активної енергії мехатронним модулем пакування може бути визначене з урахуванням середнього значення її споживання з джерела живлення для сталого режиму роботи:

$$k_{p.a} = \frac{P_M}{P_M + \Delta P_n + \left|\Delta P_{0M}\right|}, \tag{8}$$

де P_M — механічна потужність мехатронної системи; ΔP_n — сумарна потужність втрат у всіх елементах системи; $\Delta P_{0M} = \Delta P_M - P_{0M}$ — різниця між реальною й теоретичною (за ідеальних умов роботи) механічною потужністю системи, витраченої на виконання роботи пакування.

Принципова відмінність оцінок ефективності використання енергетичного ресурсу мехатронної електромеханічної системи пакування за формулою (1) та (2) від узагальненого показника енергетичної ефективності H полягає у врахуванні відхилення параметрів функціональних технологічних характеристик її мехатронних модулів від заданих за допомогою сумарної різниці енергій ΔE_0.

Наприклад, вплив додаткових зовнішніх динамічних навантажень на систему регулювання швидкості мехатронним модулем лінійного переміщення на основі використання лінійного електроприводу постійного струму під час виконання операції переміщення ряду або шару споживчих упаковок призводить, залежно від знаку неузгодженості, до зміни потужності системи. Тож запропонована методика дасть змогу проаналізувати ефективність використання енергетичного ресурсу як показника досягнення мети та визначити його зменшення.

- ефективності використання повної енергії:

$$k_{p.n} = \frac{P_M}{S}, \tag{9}$$

де S — повна потужність мехатронної системи пакування, яка характеризує режим її електроспоживання;

- ефективності перетворення електричної енергії

$$k_{p.\text{e}} = \frac{P_e}{S}, \tag{10}$$

де P_e — активна потужність, спожита мехатронною системою пакування.

Для перевірки адекватності отриманих аналітичних результатів було виготовлено експериментальну установку функціонального мехатронного модуля лінійного переміщення структурних одиниць групової упаковки (рис. 2). Робота системи керування мехатронного модуля базувалась на реалізації заданого закону руху робочого органу за умови керування енергетичним ресурсом згідно із запропонованою математичною моделлю.

Результати аналітичних досліджень витрат енергії представлені у вигляді графіків витрати енергії (загальної та реактивної) під час реалізації оптимального закону переміщення ряду споживчих упаковок. Змінним зовнішнім фактором для визначення якості споживання мехатронним модулем енергетичного ресурсу був кут нахилу твірної площини (рис. 3).

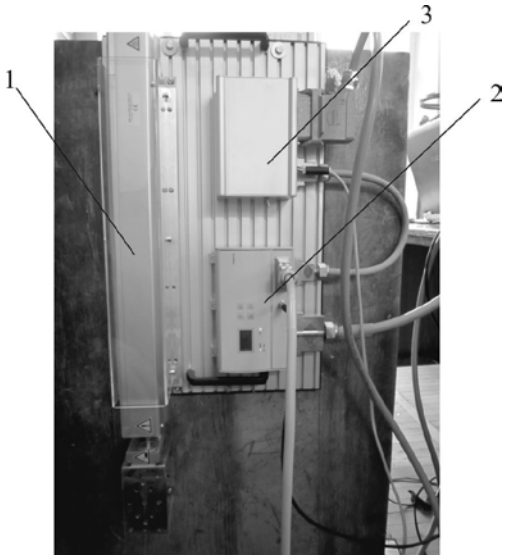

Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки мехатронного модуля з лінійним двигуном для виконаних технологічних, лінійного переміщення структурних одиниць групової упаковки: 1 — лінійний електродвигун; 2 — контролер; 3 — система зворотного зв'язку

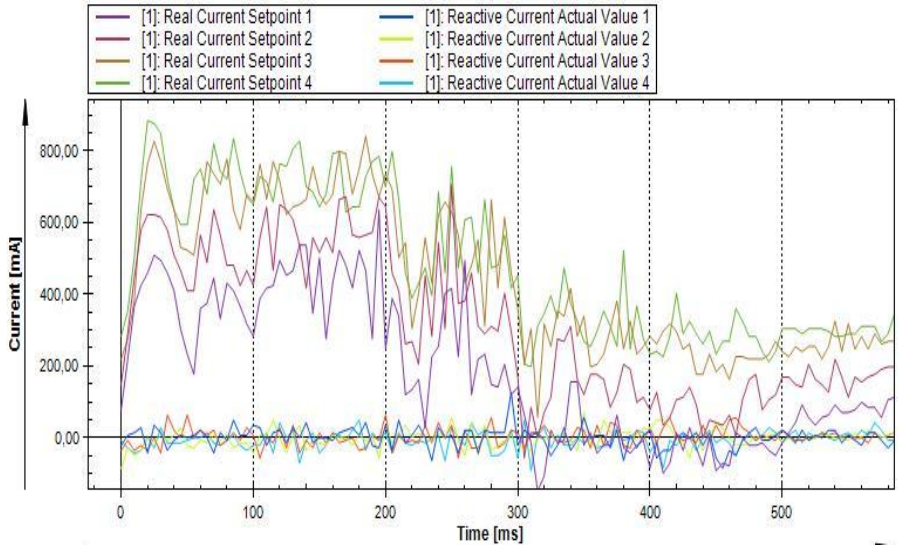

Рис. 3. Споживання енергії в мехатронному модулі лінійного переміщення під час операції зіштовхування ряду за оптимальним законом руху (маса 4 упаковок — 2 кг, відстань 270 мм) з кутом нахилу твірної площини: 1 — 0^0; 2 — 30^0; 3 — 60^0; 4 — 90^0

Висновки

Наведена математична модель мехатронної системи пакування дає змогу визначити основні способи підвищення ефективності використання її енергетичного ресурсу з урахуванням структурних особливостей конструкції шляхом:

- розробки оптимальної структури мехатронних модулів та її елементів на основі їх енергетичних характеристик споживання;

- визначення якості системи керування мехатронними системами пакування за критерієм ефективного використання електроенергії;

- розробки способів діагностування та рекуперації енергетичних ресурсів мехатронних систем пакування.

Література

1. Гавва О. М., Беспалько А. П., Волчко А. І., Кохан О. О. Пакувальне обладнання: підручник. Київ: ІАЦ Упаковка. 2010. 746 с.

2. Якимчук М. В. Науково-технічні засади створення обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів: дис. … докт. техн. наук: спец. 05.18.02 / НУХТ. Київ. 2016. 447 с.

3. Васильев А. Л. Модульный принцип формирования техники: книга. Москва: Издательство стандартов.1989. 240 с.

4. Пашков Е. В., Осинський Ю. А. Промышленны механотронные системы на основе пневмопривода: учебн. Сев. : СевНТУ, 2007. 401 с.

5. Конторов Д. С, Конторов М. Д., Слока В. К. Радиоинформатика: книга. Москва: Радио и связь. 1993. 286 с

6. Крутіков Г. А. Синтез енергозберігаючих гідропневмоагрегатів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук: спец. 05.05.17 / Нац. тех. ун-т «Харків. політех. ін-т». Харків. 2011. 35 с.

7. Евдокимов А. И., Осипов В. А. Схемы энергосбережения для пневматических приводов. Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей. 2003. С. 364—365.

8. Пальчевський Б. О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів): навч. посіб. Львів: Світ, 2007. 392 с.