

RECOVERY OF KINETIC ENERGY IN INDUSTRIAL MACHINES

A. Sokolenko, K. Vasilkovskiy, O. Stepanets
National University of Food Technologies

Key words:

machine cycles,
regeneration,
kinetic energy,
synchronization,
motion,
kinematics,
neven

ABSTRACT

The information relating to machine production lines in the food industry. The purpose of these machines is to perform one or more operations in series or in parallel.

The aim of study was to evaluate areas of synthesis machines, which lead to the possibility of recovery of kinetic energy transients. It is shown that technological machines regulation of cyclic action requires special measures to limit the unevenness of progress to achieve kinematic accuracy. One of the areas of influence recommended using drives with renewed energy flows sync them stages of acceleration and slow movement of workers. This synchronization restrictions except uneven progress leads to the possibility of regenerating kinetic energy of the interaction of two energy flows. Cases for cyclically operating machinery the possibility of the application of Malta-mechanisms.

Article history:

Received 5.10.2015
Received in revised form
30.10.2016
Accepted 7.11.2016

Corresponding author:

mif63@i.ua

РЕКУПЕРАЦІЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИНАХ

А.І. Соколенко, д-р техн. наук,
К.В. Васильківський, канд. техн. наук,
О.І. Степанець, канд. техн. наук
Національний університет харчових технологій

Метою дослідження була оцінка напрямків синтезу машин, які створюють можливість рекуперації кінетичної енергії в перехідних процесах. Показано, що регулювання технологічних машин циклічної дії потребує спеціальних заходів щодо обмеження нерівномірності їх ходу з метою досягнення кінематичної точності. Одним із напрямів таких впливів є використання приводів з подвоєними енергетичними потоками з синхронізацією в них етапів розгону і сповільненого руху робочих органів.

Ключові слова: машини-автомати, цикли, регенерація, кінетична енергія, синхронізація, рух, кінематика, нерівномірність.

Постановка проблеми. Транспортно-технологічні системи харчових виробництв будуються як сукупність апаратів, конвеєрних систем і машин-автоматів. Важливою складовою таких сукупностей є автоматизовані поточкові лінії з висо-

ким рівнем синхронізації їх складових. При цьому знаходять використання машини-автомати, призначенням яких є виконання однієї або кількох операцій у послідовному або паралельному виконанні. Так, наприклад, автомат для закорковування пляшок або банок виконує одну операцію, а в автоматі для фасування газованих напоїв послідовно реалізуються операції вакуумування, наповнення пляшок діоксидом вуглецю та фасування напоїв. При цьому вакуумування і наповнення пляшок діоксидом вуглецю може бути кількарізним. Вказані операції виконуються послідовно в безперервному русі каруселі, або в циклічних режимах в автоматах лінійного типу з синхронізацією подавання тари, формування з неї рядів або масивів певної геометрії, завантажування і розвантажування. Така синхронізація забезпечується використанням жорстких кінематичних зв'язків або за рахунок систем керування. Ці обидва напрямки існують як рівноправні в окремому використанні або в поєднанні.

Разом з тим, в лініях високої продуктивності розповсюджені кінематичні зв'язки між окремими машинами-автоматами у формі накопичувальних пристроїв, бункерів, касет, живильників тощо. Поєднання сучасних можливостей механіки, контролерів, засобів електроніки і комп'ютерних технологій призвело до появи інтегральної технології під назвою механотроніка, в рамках якої стало можливим підвищення точності регулювання перебігу кінематики і динаміки перехідних процесів. Важливо, що такі можливості відкривають нові перспективи в машинобудуванні і рекуперації механічної енергії в циклічно діючому обладнанні.

Мета дослідження: оцінити можливості і перспективи регенерації кінетичної енергії в технологічних машинах.

Результати досліджень. Одним із напрямків обмеження енергетичних витрат пропонується використання приводів машин з кількома (частіше подвоєними) енергетичними потоками. Дублювання енергетичних потоків може стосуватися як окремих машин, так і робочих органів в одній або в кількох машинах. Поширеними в техніці прикладами з дублюванням робочих органів є повітряні компресори, компресори холодильних машин, поршневі насоси, двигуни внутрішнього горіння тощо, в яких чітко визначена синхронізація роботи досягається використанням важільних механізмів на основі колінчастих валів як ведучих ланок. Подібне влаштування вказаних пристроїв супроводжується їх компактністю, однак потребує заходів щодо зрівноваження й обмеження таким чином динамічних навантажень. В окремих випадках для регулювання ходу в таких машинах використовують маховики, які відіграють роль акумуляторів механічної енергії. Результативність останніх пов'язана з їх масами, геометрією і частотами обертання, що визначає не лише позитив при їх застосуванні. Обмежені можливості маховиків у ролі акумуляторів механічної енергії мають прояв у випадках переміщень значних мас циклічно діючих машин, в яких вони чергуються з фазами вистоїв за рахунок використання крокових механізмів.

Реалізація системи з двох технологічних машин з двома енергетичними потоками стосується однотипних за призначенням кінематичних і динамічних параметрів пристроїв. Схеми такого пристрою відповідає рис. 1.

Нехай завданням технологічних машин є виконання таких операцій: виділення полістиленового стаканчика, підведення його в зону фасування продукції, здійснення фасування, переведення стаканчика в зону накладання кришки і герметизації упаковки, маркування упаковки, підведення її в зону вивантаження і здійснення останнього.

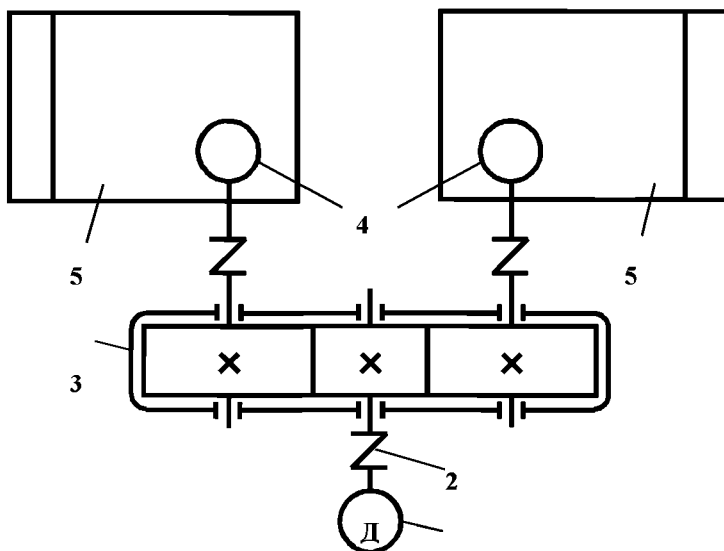


Рис. 1. Система з двох технологічних машин із синхронізованим приводом: 1 — двигун; 2 — муфта; 3 — редуктор-подільник потоків; 4 — механізм крокових переміщень; 5 — технологічні машини

У зв'язку з цим для роботи кожної машини характерні фази переміщення ротора і фази вистою. Доцільно, щоб тривалість фаз вистою, як і фаз переміщень, була б однаковою. Очевидно, що кожна фаза переміщення складається з двох етапів, на першому з яких кутові швидкості каруселей зростають від нуля до ω_{\max} , а на другому — зменшуються від ω_{\max} до нуля. В першому наближенні приймаємо, що тривалість першого і другого етапів однакова. Це означає можливість початкового зміщення однієї каруселі відносно іншої на кутовий крок, що відповідає переміщенню на одному етапі. Тоді етапу збільшення кутової швидкості каруселі на першій машині відповідає етап зменшення швидкості на другій, що одночасно означає збільшення кінетичної енергії ротора першої машини і зменшення кінетичної енергії ротора другої. Таким трансформаціям за рахунок синхронізованих кінематичних зв'язків відповідає аналогія «перетікання» кінетичної енергії за умови збігуперших і других етапів або досягання збігом етапів розгону і вистою. Останнє означає зниження енерговитрат порівняно з випадками, в яких має місце синхронізація перших і других етапів. На рис. 2 наведена графічна інтерпретація розглянутого випадку. На других етапах пере-

мішень каруселей моменти сил інерції збігаються з дією рушійних моментів, завданням яких є подолання моментів сил шкідливого опору за відсутності технологічних опорів.

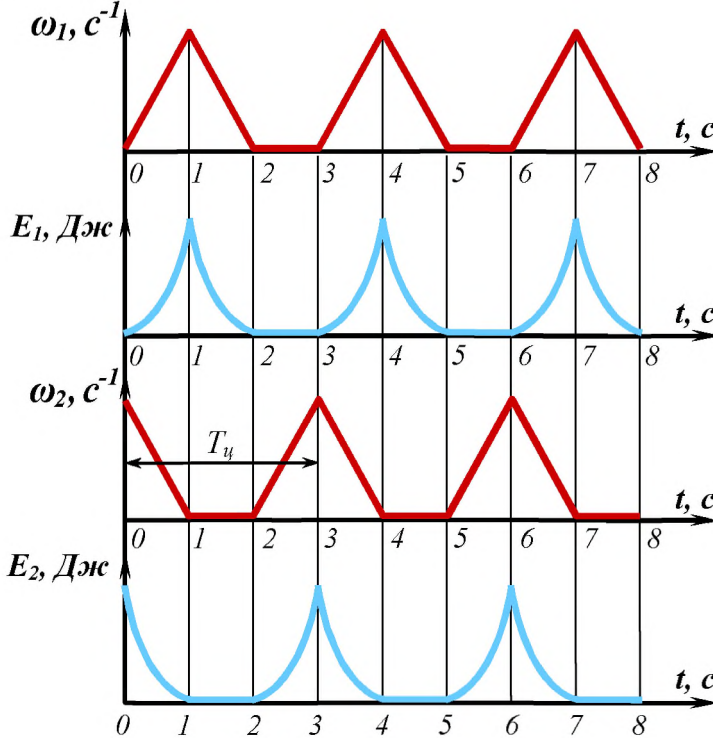


Рис. 2. Графіки зміни кутових швидкостей ω_1 і ω_2 каруселей машин і їх кінетичних енергій

Графічні залежності на рис. 2 наведені з певною мірою умовності, однак певне наближення до рівноприскорених і рівносповільнених рухів є досяжним, у тому числі з використанням сучасних можливостей мехатроніки. Хоча закономірності $\omega_1 = \omega_1(t)$ і $\omega_2 = \omega_2(t)$ можуть бути різними, однак важливо, що початку перших етапів і завершенню других відповідають значення $\omega_{1(n)}^I = 0$ і $\omega_{1(k)}^{II} = 0$ та $\omega_{2(n)}^I = 0$ і $\omega_{2(k)}^{II} = 0$ як початкові і кінцеві умови етапів.

Реалізація різних законів у крокових переміщеннях пов'язана з похибками через деформації ланок, обмеженою точністю виготовлення елементів кінематичних пар і реакціями двигунів на змінні навантаження. Однак математичне забезпечення визначення силових, кінематичних і геометричних параметрів дозволяє досягати заданих законів руху і точності позиціонування складових технологічних машин.

Для забезпечення циклічних переміщень вихідних ланок застосовують храпові, мальтійські, зубчасті механізми з неповними колесами тощо. Недоліками зубчастих механізмів з неповним числом зубців є наявність ударів у моменти початку зачеплення і початку фіксації зупинки та відсутність поділу переміщень на два етапи. Використання храпових механізмів обмежується у зв'язку з невеликою надійністю обертання на завершених переміщеннях за відсутності гальмівної системи. Мальтійські механізми характеризуються більш сприятливими кінематичними параметрами і надійним дотриманням часу переміщення і вистою. На рис. 3 наведено схеми мальтійського і заміняючого механізмів.

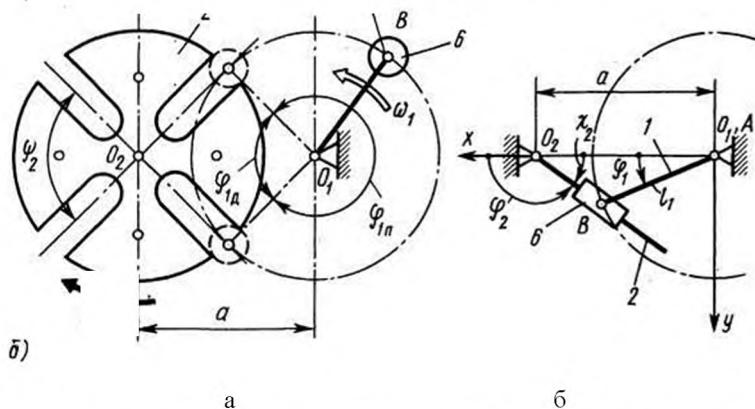


Рис. 3. Схеми мальтійського (а) і заміняючого (б) механізмів

Для технологічних машин, у яких робочий процес або операція виконується на фазі вистою, використовують вихідні ланки з обмеженим числом пазів. Це дозволяє обмежити втрати часу на допоміжний хід, що відповідає повороту вихідної ланки. Однак такий критерій не єдиний і в окремих випадках він може бути не визначальним для вибору числа пазів. Для визначення кінематичних передаточних функцій мальтійських механізмів використовують розрахункову схему, наведену на рис. 3, б у формі заміняючого механізму. В ньому куліса 2 збігається з віссю паза на диску 2, а повзун б виконує роль пальця, який ковзає по пазу при обертанні вхідної ланки 1 довжиною \$l_1\$. Довжина міжосьової відстані \$O_1O_2\$ позначена літерою а.

Кут \$\varphi_2\$ куліси при цьому:

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{l_1 \sin\varphi_1}{a - l_1 \cos\varphi_1} = \frac{\lambda_1 \sin\varphi_1}{1 - \lambda_1 \cos\varphi_1} = \frac{\sin\varphi_1}{\lambda_a - \cos\lambda_1}, \quad (1)$$

де \$\lambda_a = a/l_1\$; \$\lambda_1 = l_1/a\$.

Звідси
$$\varphi_2 = \pi - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin\varphi_1}{\lambda_a - \cos\varphi_1}\right) \quad (2)$$

або
$$\phi_2 = \pi - \psi, \quad (3)$$

де
$$\psi = \arcsin \left[-\frac{\lambda_1 \sin \phi_1}{\sqrt{1 - 2\lambda_1 \cos \phi_1 + \lambda_1^2}} \right]. \quad (4)$$

Тоді кутова швидкість і кутове прискорення вихідної ланки визначаються залежностями:

$$\omega_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = \omega_1 \frac{d\phi_2}{d\phi_1} = -\omega_1 \frac{\lambda_1 (\cos \phi_1 - \lambda_1)}{1 - 2\lambda_1 \cos \phi_1 + \lambda_1^2}, \quad c^{-1}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \omega_1^2 \frac{\lambda_1 (1 - \lambda_1^2) \sin \phi_1}{(1 - 2\lambda_1 \cos \phi_1 + \lambda_1^2)^2}, \quad c^{-2}. \quad (6)$$

Наявність розрахункових формул (5) і (6) дозволяє визначити змінні значення кінетичної енергії каруселі машини-автомата і моментів сил інерції в інтервалі одного ходу:

$$E_{\text{кін}} = I_{np} \frac{\omega_2^2}{2} = \frac{I_{np} \left(\frac{-\omega_1 \lambda_1 (\cos \phi_1 - \lambda_1)}{1 - 2\lambda_1 \cos \phi_1 + \lambda_1^2} \right)^2}{2}, \quad \text{Дж}; \quad (7)$$

$$M_i = I_{np} \varepsilon_2 = I_{np} \frac{\lambda_1 (1 - \lambda_1^2) \sin \phi_1}{(1 - 2\lambda_1 \cos \phi_1 + \lambda_1^2)^2}, \quad \text{Нм}, \quad (8)$$

де I_{np} — приведений момент інерції каруселі, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Максимальне значення кутової швидкості відповідає значенню $\phi_1 = 0$:

$$\omega_{2\text{max}} = -\omega_1 \frac{\lambda_1}{1 - \lambda_1} = -\omega_1 \frac{\sin(\pi/z)}{1 - \sin(\pi/z)}. \quad (9)$$

Передаточне відношення $u_{21\text{max}} = \omega_{2\text{max}}/\omega_1$ залежить від числа пазів z , що відображено в таблиці.

z	3	4	5	6	8	10	12
$u_{21\text{max}}$	-6,46	-2,41	-1,43	-1,0	-0,62	-0,45	-0,35

З урахуванням залежностей (5) та (9) визначимо максимальну кінетичну енергію системи:

$$E_{\text{кінтmax}} = \frac{I_{\text{нр}} \left(-\omega_1 \frac{\sin(\pi/z)}{1 - \sin(\pi/z)} \right)^2}{2}, \quad \text{Дж.} \quad (10)$$

Наведені залежності стосуються геометричних, кінематичних, динамічних і енергетичних параметрів систем з мальтійськими механізмами для реалізації крокових переміщень за умови стабілізованої кутової швидкості вхідної ланки. Такому припущенню відповідає використання синхронних електричних двигунів, тоді як асинхронні двигуни реагують на змінні технологічні та інерційні навантаження відповідно до їх стійких частин статичних механічних характеристик. Проте названі характеристики є жорсткими, завдяки чому зміни інерційних навантажень відносно мало впливають на кутові швидкості роторів. Останнє означає практичну можливість підтримувати розрахункові кінематичні параметри робочих органів технологічних машин і досягати запланованої рекуперації механічної енергії.

Висновки. Регулювання технологічних машин циклічної дії потребує спеціальних заходів щодо обмеження нерівномірності їх ходу з метою досягнення заданої кінематичної точності.

Одним із важливих заходів щодо обмеженню нерівномірності ходу технологічних машин є використання приводів з подвоєними енергетичними потоками з синхронізацією в них етапів розгону і сповільненого руху робочих органів. Вказана синхронізація, окрім обмежень нерівномірності ходу, призводить до можливості регенерації кінетичної енергії у взаємодії двох енергетичних потоків.

Поглиблений аналіз кінематики і динаміки мальтійських механізмів показав можливість їх застосування в подвоєних технологічних машинах для реалізації регенерації механічної енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Якимчук, М.В. Науково-технічні засади створення обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Якимчук Микола Володимирович; Нац. ун-т харч. технол. — К., 2016. — 38 с.
2. Функціонально-модульне проектування пакувальних машин: монографія / О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук та ін. — К.: Видавництво «Сталь», 2015. — 547 с.
3. Стоцько, З.А. Моделювання технологічних систем: навч. посіб. / З.А. Стоцько; друге видання, перероб. і доп. — Львів: «Львівська політехніка», 2013. — 188 с.
4. Берник, П.С. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посіб. для студ. вищ. техн. та агр. навч. закл. Ч. 1 / П.С. Берник, З.А. Стоцько, І.П. Паламарчук, В.В. Яськов, І.А. Зозуляк. — Львів: «Львівська політехніка», 2004. — 335 с.
5. Бурдо, О.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах / О.Г. Бурдо, Л.Г. Калинин. — Одесса: Друк, 2008. — 348 с.
6. Теория механизмов и машин / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др. — М.: Высшая школа, 1987. — 496 с.
7. Пальчевський, Б.О. Дослідження технологічних систем. Моделювання, проектування, оптимізація: навч. посіб. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. / Б.О. Пальчевський. — Львів: «Світ», 2001. — 232 с.

РЕКУПЕРАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИНАХ

А.И. Соколенко, К.В. Васильковский, О.И. Степанец

Национальный университет пищевых технологий

Целью исследования была оценка направлений синтеза машин, которые приводят к возможности рекуперации кинетической энергии в переходных процессах. Показано, что регулирование технологических машин циклического действия требует специальных мер по ограничению неравномерности их хода с целью достижения кинематической точности. Одним из направлений таких воздействий рекомендуется использование приводов с удвоенными энергетическими потоками с синхронизацией в них этапов разгона и замедленного движения рабочих органов.

Ключевые слова: *машины-автоматы, циклы, регенерация, кинетическая энергия, синхронизация, движение, кинематика, неравномерность.*