

# METHODOLOGY OF DESIGN OF PACKING MACHINES ON THE BASIS OF MECHATRONIC MODULES

O. Gorchakova, A. Derenivska, M. Yakymchuk\*, A. Bespalko  
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
mechatronics, mechatronic module, packaging equipment, library of mechatronic modules, structural synthesis	The creation of new packing equipment that has a flexible structure and is universal for various types of food products, packing materials and transport containers is the main task today. Its solution requires a system approach, starting from the development of the concept design of the automated flow lines of packaging and finishing with constructions of executive mechanisms. Nowadays such concept can be the concept of usage of the mechatronic principle of design that allows to create libraries of functional mechatronic modules and to combine them between each other, creating a wide range of parametrical rows of package of one functional purpose with flexible structure of technological processes at the level of the automated control system
<b>Article history:</b> Received 24.05.2016 Received in revised form 28.05.2016 Accepted 10.06.2016	
<b>Corresponding author:</b> zhurybeda@mail.ua *ORCID: 0000-0002-6324-7743	

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН НА ОСНОВІ МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ

О.М. Горчакова  
А.В. Деренівська, канд. техн. наук  
М.В. Якимчук, канд. техн. наук  
А.П. Беспалько, канд. техн. наук  
Національний університет харчових технологій

Створення нового пакувального обладнання, яке має гнучку структуру та є універсальним для різних типів харчових продуктів, пакувальних матеріалів та тари є основною задачею сьогодення, її вирішення потребує системного підходу. Такою концепцією сьогодення може бути концепція використання мехатронного принципу проектування, який дозволяє утворювати бібліотеки функціональних мехатронних модулів та поєднувати їх між собою.

**Ключеві слова:** мехатроніка, мехатронний модуль, пакувальне обладнання, бібліотека мехатронних модулів, структурний синтез

**Вступ.** Враховуючи кризові явища в економіці, реалії сьогодення пакувальної індустрії характеризуються нестабільністю та непрогнозованістю номенклатури ринку пакованої продукції, його залежністю від фінансового стану споживача, що потребує від виробників суттєвих кроків щодо особливих вимог до пакувального обладнання. Насамперед це — гнучкість [1], яка характеризується зручністю перенастроювання обладнання з метою оперативного переорієнтування на випуск іншої продукції, якої потребує ринок.

Результати аналізу перспектив розвитку пакувального обладнання підтверджують експертні прогнози [2] щодо появи п'ятого і шостого поколінь пакувальних машин. Четверте працює вже

зараз. Це програмовані машини автоматичної дії. Пакувальні машини нового покоління з функцією гнучкості потребують нових робочих органів та їх приводів, які відповідали б новим вимогам експлуатації. Це мають бути керовані і контрольовані приводи. Четверте покоління пакувального обладнання має електронні системи керування, які ґрунтуються на спільному використанні компонентів різної фізичної природи. Встановлено, що в пакувальному обладнанні розрізняють три основних функціональних блоки, які характеризуються з'єднанням відповідних функціональних елементів в системі: механічну, електричну та апаратно-програмну. Таке взаємопроникнення електричної системи в механічну та синергетична апаратно-програмна інтеграція складових елементів утворюють мехатронний об'єкт.

За визначенням [3] мехатроніка (рос. *мехатроника*, англ. *mechatronics*, нім. *Mechatronik f*) — це галузь науки і техніки, заснована на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними і комп'ютерними компонентами, що забезпечує проектування і виробництво якісно нових модулів, систем і машин з інтелектуальним управлінням їх функціональними рухами. Мехатроніка є своєрідною сучасною філософією проектування складних керованих технічних об'єктів.

Мехатронний підхід до проектування нового пакувального обладнання полягає в тому, що такі об'єкти повинні створюватися як органічно-цілісні електро-механо-гідро-електронні технічні системи, що включають електронно-комп'ютерну апаратуру автоматизованого управління.

Аналіз літературних та інформаційних джерел [2–4] стосовно проектування пакувального обладнання з мехатронних модулів показав, що цілісної науково-обґрунтованої методології їх формування наразі не існує. Під поняттям методології в такому випадку будемо розуміти цілісну систему знань, яка відображає об'єктивну реальність та дає можливість глибоко проникнути в сутність феномену «формування пакувального обладнання з мехатронних модулів».

**Постановка задачі дослідження.** Розробка такої методології потребує вирішення таких завдань: формування понять, визначень та термінів; встановлення зв'язків і загальних об'єктивних закономірностей процесу формування мехатронних модулів; розроблення методів погодження установочних та приєднувальних розмірів для з'єднання з іншими мехатронними модулями з метою створення складної технічної системи; розроблення методик створення параметричних та типорозмірних рядів мехатронних модулів з однією або декількома функціональними властивостями; розроблення та опис послідовності формування пакувального обладнання з мехатронних модулів на базі критеріїв оцінювання ефективності функціонування технічних систем.

Слід зазначити, що концепція створення наукових основ формування пакувального обладнання з мехатронних модулів передбачає новий погляд на технічний об'єкт як на доволі складну систему.

За визначенням мехатронний модуль [3] є функціонально і конструктивно самостійним виробом. Таке визначення мехатронного модуля не дає повної картини сучасного підходу до проектування мехатронних модулів пакувального обладнання. Більш точним терміном визначення мехатронного модуля може бути таке формулювання: мехатронний модуль — цілісна технічна система, яка є конструктивно і функціонально закінченим самостійним виробом, має автоматизовану систему керування роботою робочих органів з гнучким програмним забезпеченням зміни технологічного процесу та зворотній зв'язок у вигляді використання різних типів датчиків, які забезпечують можливість сприймання інформації про зміну характеристик зовнішнього середовища; характеризується конструктивно визначеними уніфікованими каналами механічного, енергетичного та інформаційного зв'язку для синергетичного з'єднання з іншими мехатронними модулями. На основі створення однотипних функціональних мехатронних модулів можна формувати базу даних модулів. За визначенням під бібліотекою або базою даних мехатронних модулів будемо розуміти сукупність конструкцій однотипних мехатронних модулів із різними функціональними та конструктивними типорозмірами, які відповідають заданому параметричному ряду.

Конструктивне об'єднання типових мехатронних модулів утворює мехатронну систему. Надалі мехатронну систему будемо вважати складною технічною системою, створеною на базі мехатронних модулів, об'єднання яких підлягає певним функціональним закономірностям для вирішення поставленого виробничого завдання та утворює багаторівневу інтелектуальну систему керування з розгалуженою мережею зворотних зв'язків, здатну адаптуватися до зміни умов виробництва. Якщо мехатронна система створена з мехатронних модулів одного типу та різних типорозмірів, то вона називається однорідною. Мехатронна система, створена з модулів різних типів та типорозмірів, називається неоднорідною. Для проектування

мехатронних систем пропонується використовувати модульний принцип формування, який передбачає сукупність кроків, описаних математичною послідовністю вибору мехатронних модулів з невеликої кількості економічно та технічно обґрунтованих типорозмірів та побудови з них технічних систем з великою гамою змінних характеристик.

**Вирішення поставленої задачі.** Послідовність формування мехатронних систем із використанням запропонованих визначень, наведена на рис. 1.

Потреба в такій методології проектування пояснюється збільшенням функціональних вимог до новітнього пакувального обладнання.

Ланцюг послідовності операцій проектування за таким процесом передбачає виконання семи етапів. Алгоритм проектування за поданою методологією передбачає завчасне утворення бібліотек мехатронних модулів з різними функціональними призначеннями та конструктивними типорозмірами, які відповідають заданим параметричним рядам.

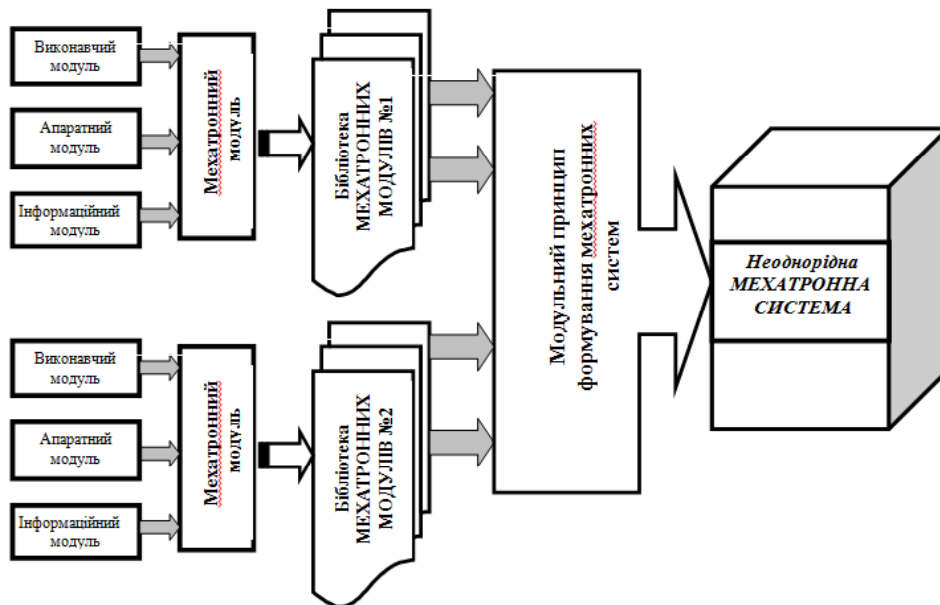


Рис. 1. Послідовність формування неоднорідної мехатронної системи

Наслідком використання запропонованої методології є отримання нового обладнання [3] з технічними характеристиками відповідно до технічного завдання за прийнятими критеріями оцінювання ефективності функціонування технічних систем та можливістю забезпечення його швидкого переналаджування при зміні технологічних або технічних умов роботи.

Головним етапом у цьому ланцюжку є створення мехатронних модулів для пакувального обладнання на основі постійного удосконалення наявних та розвиток нових видів приводів. Відповідно до прийнятого визначення щодо будови мехатронного модуля взаємозв'язок елементів виконавчої, апаратної та інформаційної функціональної області показаний на рис. 2.

Проведення структурного синтезу мехатронних модулів за запропонованою схемою (рис. 2) потребує відповідного математичного апарату.

Найнижчою ланкою в схемі структурного аналізу є кластери, які містять типорозмірні ряди модуль-елементів.

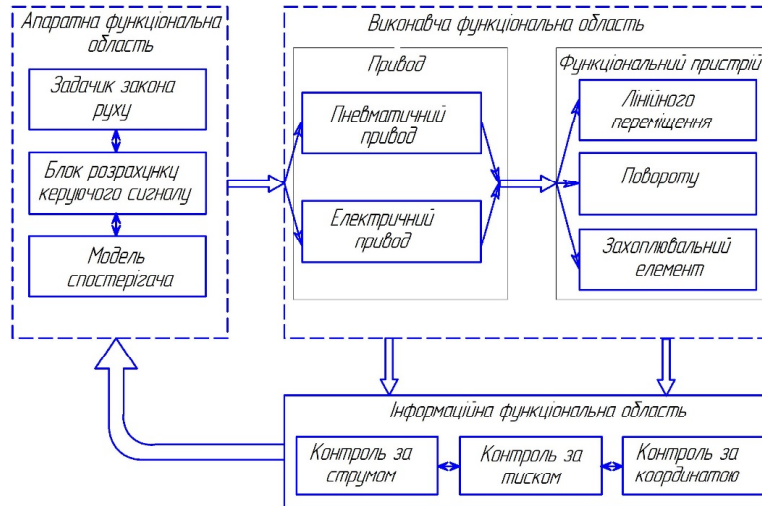
Кожен ряд в кластері представляє собою послідовність модуль-елементів, які були сформовані по визначених утворюючих критеріях типу:

$$X(d) = \{X_i^M(d_{\beta,\gamma}) : i = \overline{1, N} : \beta = \overline{1, S}\}, \quad (1)$$

де  $S(i)$  — кількість типорозмірів модуль-елементів  $i$ -го розмірного ряду;  $N$  — кількість типорозмірів цих рядів модуль-елементів;  $X_i^M(d_{\beta,\gamma})$  — число ( $M$ ) модуль-елементів в  $i$ -му розмірному ряді, кожен з яких має наступний набір параметрів

$$d_\gamma = (d_{i,\gamma}, \dots, d_{\beta,\gamma}, \dots, d_{s,\gamma}) \tag{2}$$

де  $d_{\beta,\gamma}$  — значення  $\gamma$ -го параметру,  $\gamma = 1, \overline{n(i)}$ , в  $\beta$ -му типорозмірі модуль-елементу.



**Рис. 2. Схема взаємозв'язку елементів функціональних областей: виконавчої, апаратної та інформаційної**

Для формування мехатронного модуля використовуємо три групи кластерів, модуль-елементи яких характеризуються різним функціональним призначенням: виконавчим, апаратним та інформаційним. Кожен модуль-елемент будь-якого кластера  $X_i^M$  має власну множину потенційних зв'язків  $S_i^T$  у вигляді конструктивно-приєднувальних розмірів та функціонально-керуючих роз'ємів. Розділимо дану множину на вхідні  $S_{вх}^T$  та вихідні  $S_{вих}^T$  зв'язки.

На першому етапі формування мехатронного модуля визначимо обмежену область елементної бази в кожній групі кластерів у вигляді скінченної множини модуль-елементів. Для формування такої множини задамося початковими критеріями до параметрів сортування  $\Omega\beta, \gamma; \Omega\alpha, \phi; \Omega\gamma, \alpha$ . Сортування проведемо в кожному кластері та утворимо з отриманих модуль-елементів три функціональні області: виконавчу, апаратну та інформаційну.

Наступним етапом задачі динамічного синтезу є проведення функціонально-вартісного аналізу однотипних модуль-елементів кожної утвореної функціональної області. Початковими даними для проведення аналізу є:  $\varepsilon$  — число модуль-елементів кожної утвореної функціональної області;  $N$  — число можливих модуль-елементів, вартість яких знаходиться в межах малих відхилень;  $C_\psi$  — питома вартість модуль-елемента по  $\psi$ -варіанту:  $\psi = \overline{1, \zeta}$ ;  $R_\psi$  — витрати ресурсів для функціонування модуль-елемента по  $\psi$ -варіанту:  $\psi = \overline{1, \zeta}$ ;  $r_\psi$  — допустимі експлуатаційні та конструктивні витрати модуль-елемента в даному мехатронному модулі.

Результатом проведення функціонально-вартісного аналізу повинно бути виконання умов (3) та (4):

$$\min \sum_{\psi=1}^N \varepsilon \cdot C_\psi \cdot R_\psi, \tag{3}$$

$$\sum_{\psi=1}^N C_\psi \cdot R_\psi \leq r_\psi, \tag{4}$$

які забезпечать отримання невеликої кількості (від одного до декількох) модуль-елементів в кожній функціональній області. Сформована таким чином остаточна предметна область елементної бази задовольняє експлуатаційні, функціональні та вартісні початкові критерії підбору.

Наступним етапом є поєднання модуль-елементів кожної утвореної функціональної області між собою з метою утворення можливих конструкцій мехатронних модулів. Для проведення структурного аналізу на даному етапі проектування приймемо наступні обмеження:

кожний модуль-елемент виконавчої, апаратної та інформаційної функціональної області може необмежену кількість разів використовуватись для формування альтернативних конструкцій мехатронних модулів;

сформований одиничний мехатронний модуль може мати в своїй конструкції лише один модуль-елемент виконавчої, апаратної та інформаційної функціональної області;

сформований одиничний мехатронний модуль має власні потенційні зв'язки у вигляді конструктивно-приєднувальних розмірів та функціонально-керуючих електричних роз'ємів, які складаються з множини зв'язків всіх його складових модуль-елементів.

множина отриманих альтернативних варіантів мехатронних модулів утворює бібліотеку однотипних модулів і вважається областю допустимих рішень задачі, яка задовольняє багатокритеріальні початкові умови.

Кінцеве функціональне призначення мехатронного модуля залежить від його елементної бази, яка складається з обмеженої кількості модуль-елементів з заданими функціональними властивостями. В такому випадку роботу бідь-якого мехатронного модуля можна представити у вигляді

$$\{P_{\eta}(\zeta_{\beta,\gamma}) : \eta = \overline{1, \Theta}\} \subset P \quad (5)$$

де  $P_{\eta}(\zeta)$  — вибіркова сокупність варіантів експлуатації мехатронного модуля;  $P$  — реальна сокупність варіантів експлуатації мехатронного модуля;  $\Theta$  — кількість елементарних операцій, які виконує мехатронний модуль в процесі експлуатації;  $\eta$  — елементарна операція, яку виконує мехатронний модуль в процесі експлуатації з заданою характеристикою потенційних параметрів

$$\zeta_{\beta,1}, \dots, \zeta_{\beta,\gamma}, \dots, \zeta_{s,\gamma}; \zeta_{\beta,\gamma} = f(d_{\beta,\gamma}) \quad (6)$$

Рівняння (5) представляє собою характеристику зовнішнього середовища, з яким взаємодіє мехатронний модуль в період його експлуатації. Процес поєднання модуль-елементів запишемо у вигляді функції

$$Z_{\beta,\gamma} = f(X_i^M(d_{\beta,\gamma}), \Omega_{\beta,\gamma}; d_{\beta,\gamma} : \Omega_{\beta,\gamma} \rightarrow S) \quad (7)$$

де  $d_{\beta,\gamma} : \Omega_{\beta,\gamma} \rightarrow S$  — характеристика потенційних приєднувальних зв'язків модуль-елемента. Створені таким способом мехатронні модулі мають структуру виду

$$Z_{\beta,\gamma} : (\tau)_{\beta,\gamma} = X_i^M(\zeta)_{\beta,\gamma} \quad (8)$$

де  $(\tau)_{\beta,\gamma}$  — характеристика параметрів утвореної системи

Поєднання модуль-елементів між собою передбачає і одночасне поєднання їх потенційних зв'язків. Будемо вважати, що таке поєднання можливе за умови використання всіх потенційних зв'язків кожного із модуль-елементів. Представимо множину вхідних  $S_{\text{вх},i}^{\Pi}$  та вихідних  $S_{\text{вих},i}^{\Pi}$  потенційних зв'язків кожного модуль-елементу  $X_i^M$  у вигляді

$$S_{\text{вих},i}^{\Pi} = X_i^M(S_{\text{вх},i}^{\Pi}) \quad (9)$$

В результаті поєднання отримаємо системи керування виду

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{i=1, N}(S_{\text{вх},i}^{\Pi}) &= S_{\text{вх}} \\ \underline{U}_{i=1, N}(S_{\text{вих},i}^{\Pi}) &= S_{\text{вих}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Утворена система керування передбачає контроль впливу зовнішнього середовища  $S_{вх}$  на роботу мехатронного модуля з відповідним корегуванням вихідних параметрів  $S_{вих}$ . Для цього структура системи зв'язків мехатронного модуля повинна задовольняти умовам:

$$S_{вх} \cap S_{вих} = \emptyset, S_{вх}, S_{вих} \subset S \quad (11)$$

Множина отриманих альтернативних варіантів структури мехатронних модулів утворює їх бібліотеку і вважається областю допустимих рішень задачі, яка задовольняє багатокри-теріальні початкові умови.

Параметричний ряд мехатронних модулів, які утворюють функціональну бібліотеку характеризуються виконанням однакової технологічної операції типу

$$L_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}, \dots, x_{kn}) \quad (12)$$

Передбачається, що структура обладнання для групового пакування буде складатися з обмеженої множини різнотипних мехатронних модулів, що розбиті на підмножини за функціональним призначенням: виконавчу, апаратну та інформаційну. Умова формування обладнання має вигляд:

$$L = \bigcup_{i=1}^3 \{x \mid x_{1n} \in L_1 \wedge x_{2n} \in L_2 \wedge x_{3n} \in L_3\} \quad (13)$$

Формування нового зразка пакувального обладнання характеризується методами перебору та компонування різних мехатронних модулів, які утворюють множину варіантів  $N$  з однаковою функціональною схемою формування упаковки та різними структурами  $L_{ij}$ :

$$L^{(n)} = L_{1n} \wedge L_{2n} \wedge L_{3n} \wedge \dots \wedge L_{in} \quad (14)$$

$$N = (L^{(1n)}, L^{(2n)}, L^{(3n)}, \dots, L^{(in)}) \quad (15)$$

Пошук оптимального розв'язку, тобто такого варіанту компонування машини, який найбільшою мірою задовольняє початкові умови проектування має вигляд:

$$F(L) = (f_1(L), f_2(L), f_3(L), \dots, f_n(L)) \quad (16)$$

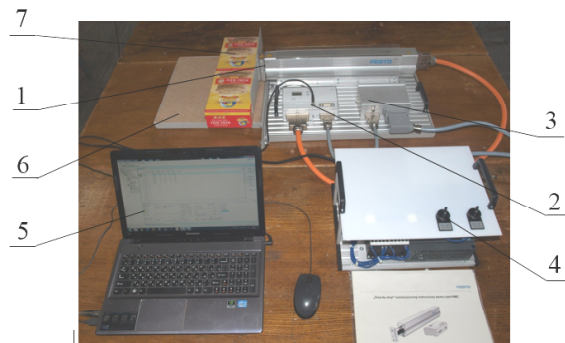
В результаті такої дії отримуємо множину розв'язків  $N'$ , з якої поступово виключаємо недомінуючі розв'язки, покроково звужуючи простір пошуку до множин пріоритетних  $L'$ , домінуючих  $L''$  і нарешті до остаточних  $L'''$  варіантів компанування. Оптимальний варіант пошуку буде мати наступну послідовність дій:

$$L_{\text{опт}} : L_{\text{опт}} \in L''', L''' \subset L'' \subset L' \quad (18)$$

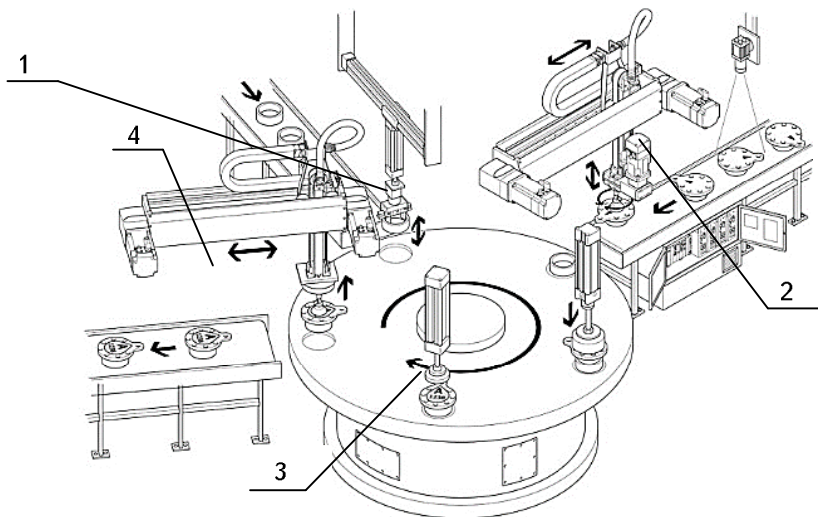
Пошук оптимізаційного синтезу структури пакувальної машин здійснюється за методами одноетапного та багатоетапного оптимізаційного синтезу.

**Приклад застосування отриманих результатів.** Прикладом утворення експериментальних мехатронних модулів лінійного переміщення з різних модуль-елементів за наведеною методикою показано на рис.3.

Прикладом комплексного конструктивного підходу до використання мехатронних модулів лінійного переміщення в пакувальному обладнанні може бути лінія роторного типу для кріплення упаковки з пластівцями до кришки термоформованої тари, в яку паковано в'язкий продукт рис. 4. Для виконання технологічного процесу використовують вісім мехатронних модулів лінійного переміщення з різним типом приводів, які завдяки електронній системі керування вищого рівня синхронізовано виконують подачу упаковки з пластівцями 1 та заповненої термоформованої тари 2, переміщення механізму зварювання 3 та подачу пакувальної одиниці на відповідний конвеєр 4.



**Рис. 3. Експериментальні зразки мехатронних модулів лінійного переміщення:**  
 1 — лінійний двигун; 2 — контролер; 3 — система зворотного зв'язку; 4 — блок живлення;  
 5 — комп'ютер; 6 — змінні поверхні переміщення; 7 — структурний елемент групової упаковки



**Рис. 4. Схема роторної лінії для кріплення упаковки з пластівцями до кришки термоформованої тари з язиким продуктом**

**Висновки.** Таким чином на основі проведених досліджень та аналізу роботи мехатронних модулів можна стверджувати, що найбільш якісний результат використання мехатронних модулів у пакувальному обладнанні можливий за умови комплексного підходу до їх компонування під час проектування нового обладнання. Беззаперечною перевагою мехатронних модулів є можливість регулювання в широкому діапазоні значень кінематичних та динамічних параметрів робочих органів, синхронізація їхніх параметрів, що суттєво збільшує продуктивність пакувального обладнання. Можливість позиціонування робочих органів мехатронних модулів із значною пам'яттю змінних координат дає змогу розширити функціональні можливості пакувального обладнання, що є суттєвим поштовхом для утворення нових систем діагностики та швидкого переналагодження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гавва О.М. Пакувальне обладнання: перспективи розвитку / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко // Харчова і переробна промисловість. — 2009. — №4—5. — С. 28—30.
2. Пакувальне обладнання: підручник / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко, О.О. Кохан. — К.: ІАЦ Упаковка, 2010. — 746 с.
3. Колодин І.М. Модульний принцип создания новой техники в машино- и приборостроении / И.М. Колодин, Л.В. Волошина. — К.: Укр. НИИНТИ, 1982. — 51 с.
4. Пашков Е.В. Промышленные мехатронные системы на основе пневмопривода: учебн. / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский. — Сев.: СевНТУ, 2007. — 401 с.

# МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПАКОВОЧНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

**О.Н. Горчакова, А.В. Дереновская, Н.В. Якимчук, А.П. Беспалько**

*Национальный университет пищевых технологий*

*Создание нового упаковочного оборудования, которое имеет гибкую структуру и является универсальным для различных типов пищевых продуктов, упаковочных материалов и тары является основной задачей сегодняшнего дня. Ее решение требует системного подхода, начиная с разработки концепции проектирования автоматизированных поточных линий упаковки и заканчивая конструкциями исполнительных механизмов. Такой концепцией в настоящее время может быть концепция использования мехатронного принципа проектирования, который позволяет создавать библиотеки функциональных мехатронных модулей и сочетать их между собой.*

**Ключевые слова:** мехатроника, мехатронный модуль, упаковочное оборудование, библиотека мехатронных модулей, структурный синтез.