УДК 627.798.34
Б.О. Пальчевський, Т.Л. Вараніцький
Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН

В статті проведено конструкторський та технологічний аналіз груп паковань. Прослідковано взаємозв'язок між функціональними модулями пакувального автомату та відповідними їм групами конструкцій пакетів. Запропоновано спосіб розрахунку показника універсальності пакувальної машини.

Ключові слова: *пакувальна машина, упаковка, універсальність, пакет.*

Стрімкий розвиток науки і техніки постійно стимулює виробництво, що призводить до насичення світового ринку харчових продуктів новими товарами. Життєвий цикл товарів стає все більш коротким, а асортимент продукції все більш розширюється. Як результат підвищується кількість різновидів конструкцій паковань, що породжує процес ускладнення пакувального обладнання та підвищення їх функціональності.

Поліфункціональні пакувальні машини зазвичай створюються для виготовлення певної, наперед заданої, групи паковань. Тому процес проектування поліфункціональних пакувальних машин починається з аналізу варіативності конструкцій готової продукції.

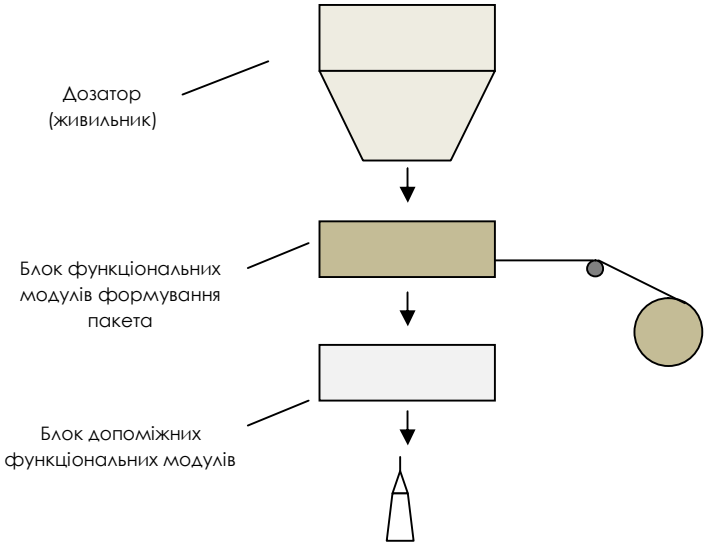

Рис. 1. Схема пакувальної машини для сипких продуктів

Оцінка варіативності групи виробів проводиться з допомогою математичної моделі, загальним принципом побудови якої є ієрархічна декомпозиція виробу на структурні складові – конструктивні елементи. Кожен конструктивний елемент характеризується формою та конструкторсько-технологічними параметрами. У відповідність конструктивному елементу ставлять елементарний перехід його утворення. В свою чергу кожен такий перехід може бути реалізований множиною функціональних модулів (ФМ). А це призводить до складної задачі оптимізаційного синтезу для пакувальних машин із значною кількістю ФМ.

Зважаючи на значну різноманітність тари та активний розвиток конструкцій механізмів обладнання практичне створення універсальних пакувальних машин часто може стати досить складною задачею. Для цього використовуються різні методи оптимізації структури пакувальних машин. Ці методи повинні забезпечити не тільки синтез структури пакувального автомату, а і її оптимізацію за певною кількістю показників.

Застосування описаної послідовності проектування проведено на прикладі поліфункціональних машин для пакування сипких речовин в полімерні пакети (рис. 1). Така машина в загальному випадку складається із блоку ФМ-дозаторів для відмірювання заданої дози,

© Б.О. Пальчевський, Т.Л. Вараніцький

блоку ФМ для утворення із полімерної плівки пакету і його закупорювання після заповнення відміряною дозою та різних допоміжних ФМ.

1. Конструкторський аналіз групи паковань. Полімерний пакет можна розділити на окремі складові: корпус, верх та дно, верхній, нижній, поздовжній та кутові шви, спеціальні елементи. Для кожного елементу можна виділити множину варіантів його конструкції $E_i = \{e_1, e_2, e_3, ..., e_y\}$, де e_y – будь-який варіант конструктивного елемента (рис. 2) [1-3].

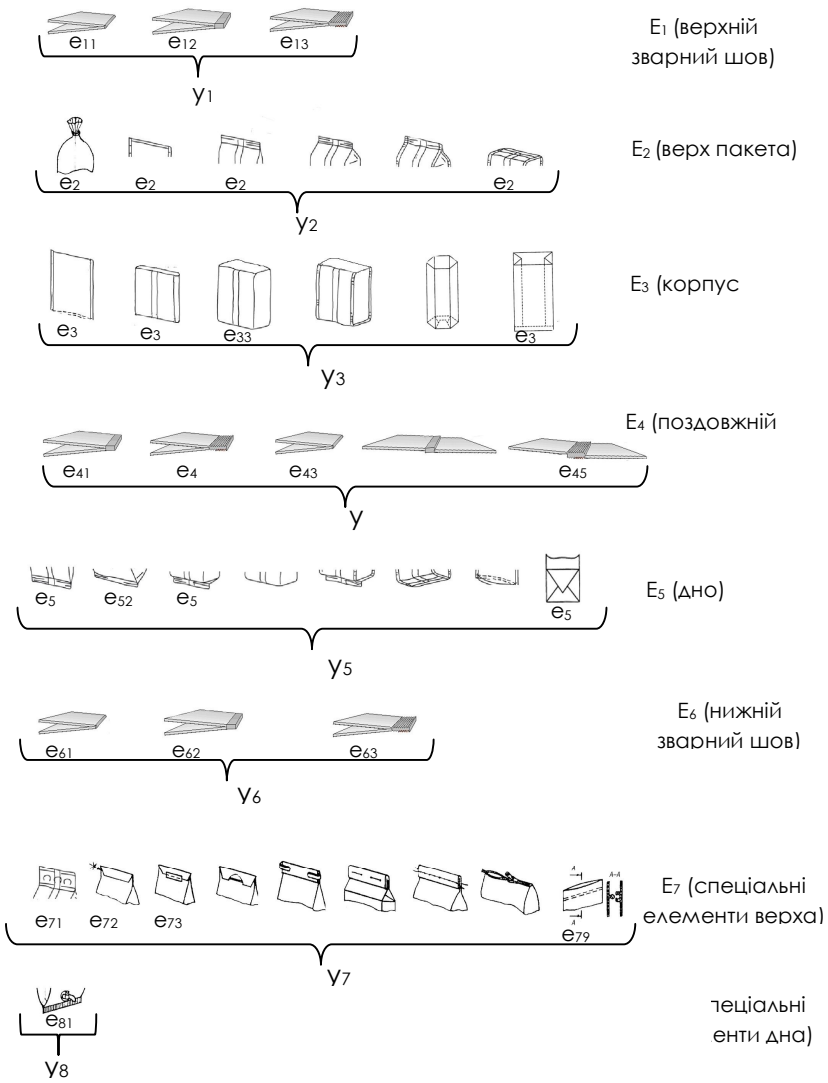

Рис. 2. Сімейство елементів виробу

Множина E всіх конструктивних елементів, які входять до сімейства, може бути представлена як у вигляді дерева (рис. 3), так і у вигляді відповідної йому матриці розмірністю $x \times y$, причому x – кількість різнотипних елементів пакета:

$$E = \{E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup ... \cup E_x\},$$

$$E = \begin{pmatrix} e_{11} & ... & e_{1y} \\ ... & & ... \\ e_{x1} & ... & e_{xy} \end{pmatrix}.$$

В графовому представленні вузли розгалужень визначають типи елементів конструкції паковання, а кінцеві вузли – їх конструктивне виконання. Кількість кінцевих вузлів графа (рис. 3) визначатиме потужність множини E, тобто кількість всіх можливих конструктивних елементів. Ця

величина є сумою кількостей варіантів y_i кожного конструктивного елемента пакета, а також може бути розрахована за кількістю вузлів графа:

$$E = \sum_{i=1}^{x} y_i = s - S$$

де s – кількість віток розгалуження в графі,
S – кількість вузлів розгалуження в графі.

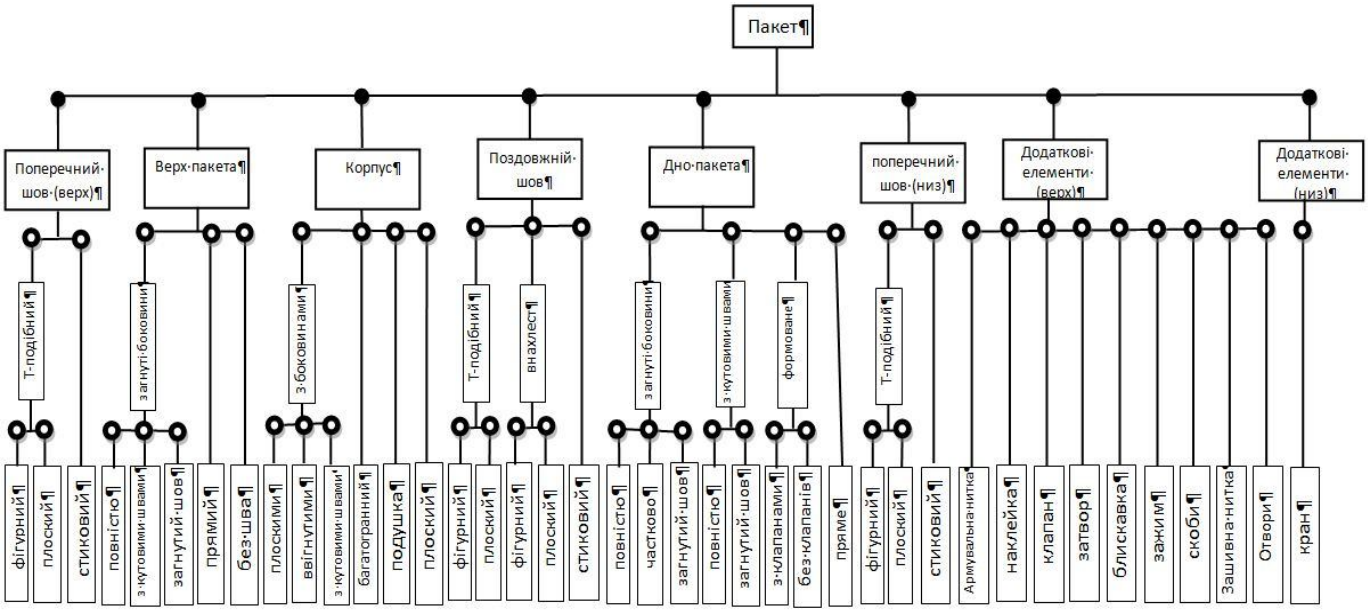

Рис. 3 Граф структури конструктивних елементів пакета

Тоді кількість усіх можливих варіантів виробів, які можна отримати з сімейства конструктивних елементів становитиме:

$$N_{\Pi} = \prod_{i=1}^{x} y_i = \prod_{i=1}^{x} (s_i - S_i) \cdot$$

Для кожного варіанту виробу опис його конструкції матиме вигляд матриці:

$$\Pi_i = \begin{pmatrix} \tilde{e}_1 \\ \dots \\ \tilde{e}_x \end{pmatrix},$$

Кількість різнотипних елементів, що входять до його конструкції становить

$$\Pi_i = x - e_i, e_i > 0,$$

а кількість усіх конструктивних елементів у виробі

$$n_{\Pi} = \sum^{x} e_i,$$

де $\tilde{e}$ - довільний елемент із рядка матриці *E*. Значення кожного елемента матриці визначатиме кількість однакових елементів, що входять до конструкції виробу.

Повторюваність елементів у конструкції окремого типорозміру виробу характеризує коефіцієнт повторюваності

$$U = \frac{П_i}{n_П},$$

а різноманітність конструктивних елементів у виробі по відношенню до всіх можливих конструкцій - коефіцієнт різноманітності:

$$V = \frac{П_i}{E}.$$

Таким чином, коефіцієнт варіативності сімейства виробів можна визначити як добуток середніх значень повторюваності та різноманітності:

$$K_{\text{var}} = \left(\frac{1}{E}\sum^{E}\frac{П_i}{n_П}\right)\cdot\left(\frac{1}{E}\sum^{E}\frac{П_i}{E}\right) = \bar{U}\cdot\bar{V}\cdot$$

2. Технологічний аналіз групи паковань. Технологічна складність переналагоджень визначається спільними та відмінними елементами конструкції окремих виробів і може бути охарактеризована наступними показниками:

Коефіцієнт подібності

$$C = \frac{|П_1 \cap П_2|}{|П_1 \cup П_2|} = \frac{c}{в},$$

де c – кількість однакових варіантів конструктивних елементів двох виробів, $в$ – кількість усіх варіантів конструктивних елементів, що застосовані у двох виробах.

Коефіцієнт відмінності

$$B = \frac{|П_1 \Delta П_2|}{|П_1 \cup П_2|} = \frac{p}{в} = 1 - C,$$

де p – кількість відмінних варіантів конструктивних елементів двох виробів.

Кількість усіх варіантів конструктивних елементів, що застосовані у двох виробах можна розрахувати, додавши матриці, що їх представляють – кількість ненульових елементів покаже значення величини $в$:

$$в = |e > 0| \,|\, П_1 + П_2.$$

Спільні елементи конструкції двох виробів визначаються кількістю ненульових елементів при поелементному множенні відповідних матриць:

$$c = |e > 0| \,|\, П_1 * П_2.$$

Коефіцієнт відносної подібності

$$C_R = \frac{P_2}{P} = \frac{p_2!/2(p_2-2)!}{N_П!/2(N_П-2)!},$$

де $p_2 = |p > 2| \,|\, \{c - в\}$, визначає відношення кількості переходів P_2 від одного виробу до іншого із застосуванням більш ніж одного переналагодження до всіх можливих варіантів переналагоджень P. Цей процес є переходом між вітками на одному ярусі графа. Тобто цей коефіцієнт показує частку виробів, що відрізняються хоча б двома ознаками.

Середня кількість переналагоджень

$$\overline{P} = \frac{\sum B}{P}$$

показує усереднене значення кількості необхідних переналагоджень при переході між двома виробами.

Таким чином, коефіцієнт складності переналагодження сімейства виробів можна визначити за наступною залежністю

$$K_{adj} = \overline{C}_R \cdot \overline{P}.$$

3. Розрахунок показника універсальності. Приймемо допущення, що кожен ФМ послідовно утворює на виробі певний елемент із заданої множини їх можливих типорозмірів.

Загальна кількість типорозмірів виробів, яку може виготовляти пакувальна машина визначається залежно від її структури та набору конструктивних елементів, що виготовляють окремі ФМ.

Для машини, що складається з кількох послідовно працюючих ФМ, кількість типорозмірів виробів визначається як добуток множин конструктивних елементів, які може виготовити кожен з ФМ (рис. 4):

$$N_{\Pi}^{ФМ} = \prod_{i=1}^{x} E_i^{ФМ},$$

де $E_i^{ФМ}$ – кількість варіантів конструктивних елементів виробу, які реалізовує і-тий ФМ.

Під послідовним слід розуміти таке з'єднанням ФМ, при якому можна забезпечити утворення кожного елемента упаковки по черзі, причому кожен наступний доробляє попередньо оброблений виріб, і кожен готовий виріб повинен пройти обробку усіма ФМ [3].

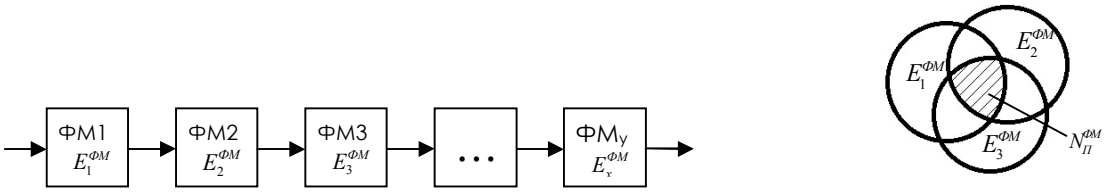

Рис. 4 Схема (а) пакувальної машини та множина виробів (б) при послідовному з'єднанні функціональних модулів

У випадку, коли ФМ може виконувати необмежену кількість варіантів конструктивних елементів, коефіцієнт універсальності для нього буде рівним одиниці. Однак, фактично такий ФМ не впливатиме на універсальність усієї машини, оскільки ті варіанти конструктивних елементів, які він виготовлятиме будуть обмежені іншими ФМ (наприклад, механізм протягування може переміщувати плівку на будь-яку довжину, однак крок переміщення буде визначатись ємністю дозатора та можливостями механізмів зварювання). Тому характеристики такого ФМ можна не брати до уваги при розрахунку показника універсальності.

Тоді коефіцієнт універсальності для послідовного з'єднання ФМ становитиме:

$$K_У^{посл} = 1 - \frac{1}{E_1^{ФМ} \cdot E_2^{ФМ} \cdot \ldots \cdot E_x^{ФМ}} = 1 - \frac{1}{N_{\Pi}^{ФМ}} = 1 - \frac{1}{\frac{1}{1-K_{У1}^{ФМ}} \cdot \frac{1}{1-K_{У2}^{ФМ}} \cdot \ldots \cdot \frac{1}{1-K_{Уx}^{ФМ}}} =$$

$$= 1 - \left[(1-K_{У1}^{ФМ}) \cdot (1-K_{У2}^{ФМ}) \cdot \ldots \cdot (1-K_{Уx}^{ФМ})\right] = 1 - \prod_{i=1}^{x} (1-K_{Уi}^{ФМ})$$

Паралельне з'єднання модулів (рис. 5) допускає реалізацію функцій в певний момент часу тільки одним із них. В такому випадку кількість типорозмірів виробів, які може виготовити q паралельно з'єднаних ФМ визначається сумою типорозмірів кожного з них

$$N_{П}^{ФМ} = \sum_{i=1}^{q} E_i^{ФМ} .$$

Можливі ситуації коли один або кілька модулів можуть сформувати однакові конструктивні елементи. Розширення функціональних можливостей в такому випадку досягається за рахунок унікальних варіантів $П_i$ складових конструкції вироба (рис. 5).

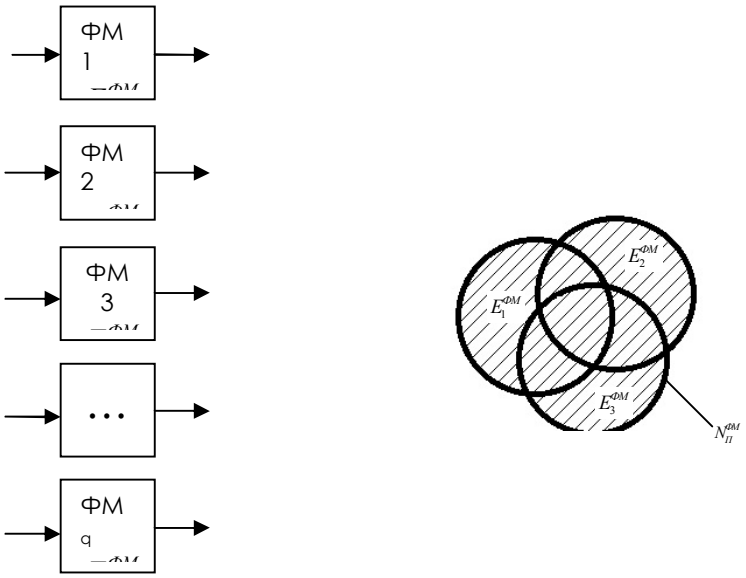

Рис. 5. Схема пакувальної машини (а) та множина виробів (б) при паралельному з'єднанні функціональних модулів

В будь-який момент часу зв'язка з паралельно з'єднаних модулів зможе виготовити

$$N_{П}^{ФМ} = \bigcap_{i=1}^{q} E_i^{ФМ} = \sum_{j=1}^{q} П_j$$

типорозмірів виробів.

Таким чином, для паралельного з'єднання ФМ коефіцієнт універсальності визначатиметься за наступною залежністю:

$$K_{У}^{пар} = 1 - \frac{1}{N_{П}^{ФМ}} = 1 - \frac{1}{\sum_{j=1}^{q} П_j},$$

Змішане з'єднання ФМ є комбінацією послідовного та паралельного. При цьому як завгодно складна ТМ зводиться до ланцюжка послідовно з'єднаних частин. Кілька ФМ, що функціонують паралельно чи послідовно на одному рівні розглядаються як одна група (рис. 6).

Для будь-якої ТМ кількість типорозмірів готової продукції та коефіцієнт універсальності можна розрахувати за наступними залежностями:

$$N_{П}^{ФМ} = \prod_{i=1}^{x} E_i^{ФМ} \cdot (1 + \sum_{j=1}^{q} П_j),$$

$$K_{У} = 1 - \frac{1}{N^{ФМ}} = 1 - \frac{1}{\prod_{i=1}^{x} E_i^{ФМ} \cdot (1 + \sum_{j=1}^{q} П_j)}$$

В реальних умовах виробництва деякі ФМ не забезпечують можливості утворення необхідних елементів виробу. Як наслідок виникають неможливі поєднання операцій технологічного процесу. Втрати на кожному ФМ становитимуть:

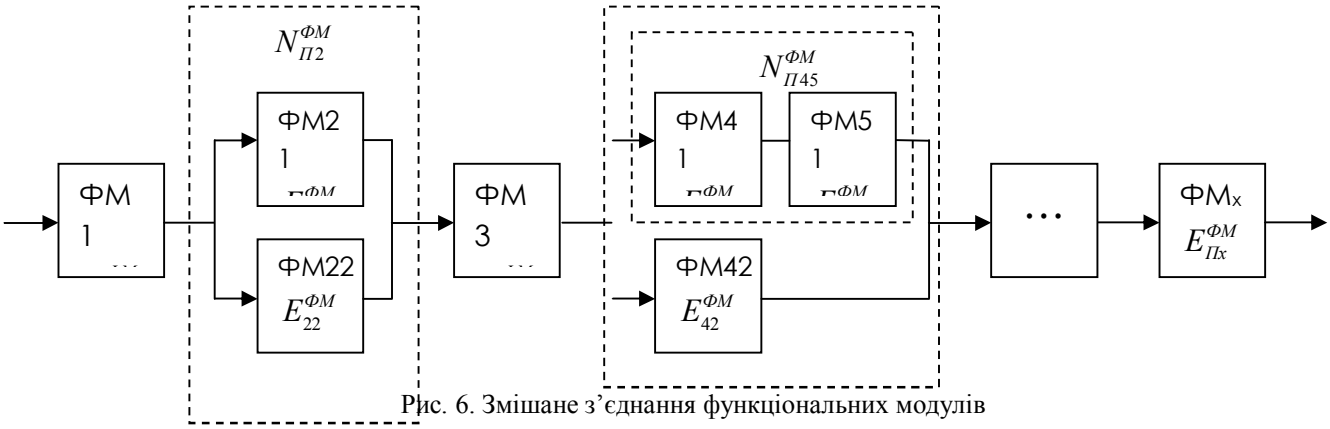

Рис. 6. Змішане з'єднання функціональних модулів

Таблиця 1

Взаємозв'язки елементарних технологічних операцій та конструкцій робочих органів ФМ

	Елементарна технологічна операція (O_i)						
	подача продукту	утворення рукава	поздовжнє зварювання	протягування	поперечне зварювання	відрізання	утворення складок
Конструктивне виконання робочого органу (m_y)	труба еліптичного перерізу	рукавоутворювач рукава еліптичного перерізу	зварювальна губка	вакуумний захват	зварювальна губка	прямий ніж	штовхач для вгинання бічної стінки
	труба багатогранного перерізу	рукавоутворювач рукава багатогранного перерізу	м-зм зварювання у вигляді ніхромової дротини	фрикційний ролик	м-зм зварювання у вигляді ніхромової дротини	гільйотинний ніж	диск для формування складки з пазами під утворення зварних швів
	труба прямокутного перерізу	рукавоутворювач рукава прямокутного перерізу	м-зм зварювання у вигляді ніхромового кільця	вакуумний ролик	м-зм зварювання у вигляді ніхромового кільця	зубчатий ніж	кулачок для формування складки
		направляючі пластини	зварювальний ролик	парні затискачі	зварювальний ролик	механізм типу «ножиці»	нерухомий упор для вгинання бічної стінки
		х-подібний елемент	парні зварювальні губки	парні вакуумні захвати	парні зварювальні губки	м-зм відрізання у вигляді ніхромової дротини	
		ролики	здвоєні зварювальні губки	парні ролики	здвоєні зварювальні губки		
			парні зварювальні ролики	парні вакуумні ролики	парні зварювальні ролики		
			комбінована зварювальна губка з ніхромовою дротиною	пасовий фрикційний механізм	комбінована зварювальна губка з ніхромовою дротиною		
			комбінація зварювальної губки та ролика		комбінація зварювальної губки та ролика		

$$h = \frac{E_i^{ФМ}}{E_i}$$

Для пакувальної машини, що складається з *x* ФМ:

$$H = \prod_{i=1}^{x} \frac{E_i}{E_i^{ФМ}},$$

$$N_П = N_П^{ФМ} \cdot H$$

Оскільки завжди *H<1*, то кількість типорозмірів пакетів, які виготовляє пакувальна машина є меншою ніж їх кількість у сімействі:

$$N_П > N_П^{ФМ}.$$

4. Зв'язок конструкцій виробу та ФМ. Перехід від сімейства упаковок до структури ТМ, відбувається через встановлення відповідності між складовими пакета та ФМ, що їх формують. При цьому виникають деякі труднощі, оскільки один і той самий конструктивний елемент може бути утворений різними способами. За аналогією зі структурою пакета для кожної елементарної технологічної операції можна визначити множину конструкцій робочого органу для її реалізації

$$O_i = \{m_1, m_2, m_3, ..., m_y\},$$

де m_y – будь-який варіант конструкції робочого органу (табл. 1).

Наприклад, поздовжній зварний шов можна отримати в результаті безперервного чи дискретного нагріву шарів плівки та стискання їх роликами чи губками різної конструкції. І навпаки – в результаті однієї елементарної технологічної операції у залежності від конструкції

ФМ може бути утворене сімейство елементів виробу. В зв'язку з цим виникає необхідність додатково описати не лише тип конструктивного елементу, а й спосіб його утворення. Взаємозв'язки між елементами та конструкцією ФМ мають вигляд «конструктивний елемент –

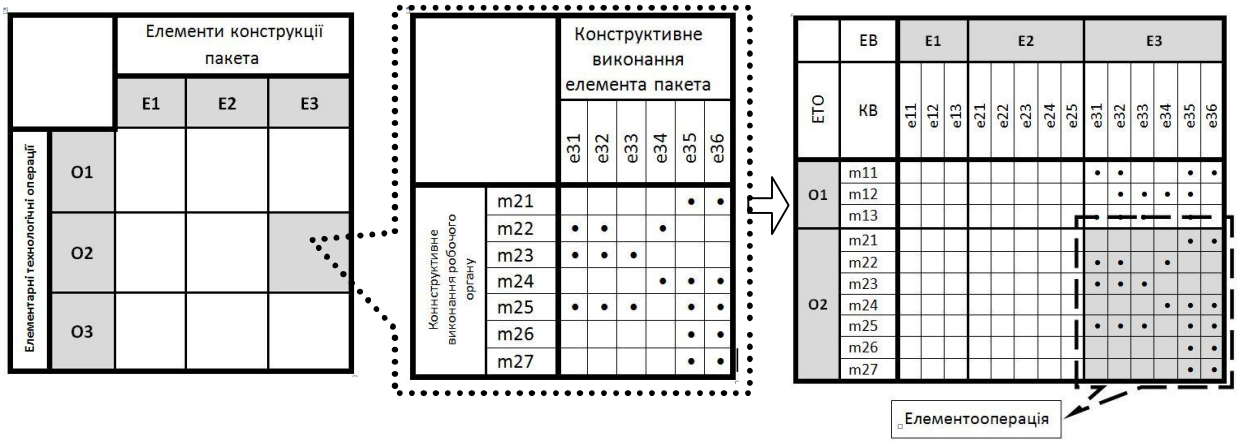

Рис. 7 Схема формування матриці конструкцій

(ЕТО – елементарні технологічні операції, ЕВ – елементи конструкції пакета, КВ – конструктивне виконання елементу вироба чи робочого органу)

варіант виконання – технологічна операція – варіанти конструкції робочого органу» (табл. 1, рис. 2). Задати такий зв'язок можна, побудувавши булеву матрицю конструкцій. Вона є масивом варіантів конструкцій ФМ та елементів пакету, вкладений в масив елементоопераций (рис. 7). Таке представлення дає можливість не лише простежити можливості того чи іншого ФМ, а й спрогнозувати альтернативні шляхи технологічного процесу виготовлення групи виробів та спроектувати на його основі поліфункціональну пакувальну машину.

© Б.О. Пальчевський, Т.Л. Вараніцький

Висновки. Поліфункціональні пакувальні машини зазвичай створюються для виготовлення певної, наперед заданої, групи паковань. При цьому відбуваються втрати універсальності на кожному з ФМ, які входять до складу машини. Результатом є те, що асортимент виготовлюваної продукції стає меншим ніж необхідна кількість типорозмірів виробів. Тому при проектуванні універсальних пакувальних машин їх функціональність забезпечують за рахунок встановлення або введення паралельного з'єднання ФМ в структуру машини.

1. Виды швов при запайке полимерных материалов [Електронний ресурс] / Matins.ru – Реж доступу: http://www.matins.ru/obzor_shov_shov.php.
2. Пакеты из полимерных пленок и комбинированных материалов. Общие технические условия. ГОСТ 12302 – М.: Стандартинформ, 2006. – С. 11.
3. Listing of Bag Types [Електронний ресурс] / Velteko Packaging Machines – Реж. доступу: http://www.velteko.com/bags/listing-of-bag-types/?no_cache=1.
4. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів): навч. посіб. – Львів: Світ, 2007. – С. 392.
5. Пальчевський Б.О. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва: Навч. посібник. – Львів: Світ, 1994. – С. 208.

© Б.О. Пальчевський, Т.Л. Вараніцький