

Присвячено 40-річчю Проблемної науково-дослідної лабораторії  
Національного університету харчових технологій



---

---

2017

# НАУКОВІ ПРАЦІ

## НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 23 № 5

Частина 1

*Журнал  
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»  
засновано в 1993 році*

КИЇВ ✦ НУХТ ✦ 2017

## MULTICRITERIAL STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF FLOW PACKING SYSTEMS' FUNCTIONAL MODULES

O. Gavva, L. Kryvoplyas-Volodina, A. Derenivska  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Analysis*  
*Synthesis*  
*Levels*  
*Functional module*  
*Interconnected*  
*Streaming and*  
*Technological systems*  
*Criteria*

---

**ABSTRACT**

On the basis of the analysis of successive stages of the technological process, such basic levels of functional modules (FM) are considered: the module as a exploitative object; module as an object of manufacture; module as an object for improvement. At the same time, the level of exploitation of the product is primary, the level of manufacturing is secondary, and the level of improvement is tertiary. Levels are interconnected by direct and feedback links that provide continuous streaming of information about the operating exploitation of the technological system, as well as providing product properties at levels of improvement and manufacturing. The need for a multicriteria approach to its design was substantiated in the article on the example of FM for flow packing systems (FPS) of packaging lines of varying complexity. The tasks of the FM formation were solved by combining structural and parametric synthesis and the conditions of choice. The concept was proposed, mathematical models and algorithms of multicriteria structural-parametric synthesis of the modular control unit according to the given characteristics were developed. An approach to take into account all functional features of the operation of FM in the process of its manufacture and improvement was developed.

---

**Article history:**

Received 10.90.2017  
Received in revised form  
28.90.2017  
Accepted 18.10.2017

---

**Corresponding author:**

O. Gavva  
**E-mail:**  
gavvaoleksandr@gmail.com

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-5-1-14

---

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДУЛІВ ПОТІКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАКУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, А.В. Деренівська  
*Національний університет харчових технологій*

*У статті на підставі аналізу послідовних етапів технологічного процесу розглянуто композицію таких основних рівнів функціональних модулів: модуль як об'єкт експлуатації; модуль як об'єкт виготовлення; модуль як об'єкт удосконалення. При цьому рівень експлуатації виробу є первинним,*

рівень виготовлення — вторинним, а рівень удосконалення — третинним. Рівні взаємозв'язані між собою за допомогою прямих і зворотних зв'язків, які забезпечують безперервні потоки інформації про умови експлуатації технологічної системи, а також про забезпечення властивостей виробу на рівні вдосконалення і виготовлення. На прикладі ФМ для потоково-технологічних систем пакувальних ліній різної складності обґрунтовано потребу в багатокритеріальному підході до їх проектування. Розв'язані задачі формування ФМ з об'єднанням структурного й параметричного синтезів та умов вибору. Запропоновано концепцію, розроблено математичні моделі й алгоритми багатокритеріального структурно-параметричного синтезу модульного блоку керування за заданими характеристиками, а також підхід для врахування всіх функціональних особливостей експлуатації ФМ в процесі його виготовлення і вдосконалення.

**Ключові слова:** аналіз, синтез, рівні, функціональний модуль, зв'язки, потоково-технологічні системи, критерії.

**Постановка проблеми.** Враховуючи сучасні завдання конструювання, компоновки і вибору пакувального обладнання в харчовій галузі, яка розвивається в умовах жорсткої конкуренції та швидкого оновлення продукції, актуальним питанням є забезпечення обґрунтованого вибору оптимальних структури й параметрів потоково-технологічних систем пакувальних ліній харчових виробництв. Скорочення термінів розроблення та виготовлення, раціонального зниження вартості, підвищення якості та конкурентоспроможності — це актуальні завдання для виробників пакувального обладнання. Найважливішими і особливо відповідальними стадіями життєвого циклу потоково-технологічних систем (ПТС) пакувальних ліній харчових виробництв є початкові стадії проектування.

Сучасні засоби обчислювальної техніки і прикладне програмне забезпечення, зокрема такі пакети, як AnyLogic, ViSSIM, MatLab, MathCAD, FluidLAB, EPLANplatform, MechanicalDesktop 5, Mechanical, SolidWork, Pro/ENGINEER, COSMOS та інші, дають можливість швидко і якісно проаналізувати й спроектувати потоково-технологічні системи пакувальних ліній харчових виробництв практично будь-якої складності. Однак у згаданих програмних продуктах подані для користування лише типові математичні методи оптимізації, що істотно обмежує їхні можливості, залишаючи користувачеві складні проблеми оцінки отриманих результатів синтезу та вибору ефективних шляхів покращення структури і співвідношення конструктивних параметрів майбутньої ПТС.

Отже, удосконалення існуючих і розроблення нових методів багатокритеріального синтезу ПТС за заданими характеристиками на основі системного підходу до оцінки їхньої якості та конкурентоспроможності є актуальним і надзвичайно важливим завданням для вітчизняного машинобудування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сукупність процесів у машинах і функціональних модулях (ФМ) пакувальної технологічної лінії є, по суті, одним великим процесом (потокком). Незважаючи на різноманітність технологій машинно-апаратного оформлення, загальним для різних ліній є те, що в них організований і функціонує безперервний технологічний потік

перетворення вихідної сировини в пакований продукт. Такий потік проаналізовано на базі методу графозаміни технологічних вузлів в [1], де описано основні критерії, які необхідно знати для створення вискоефективних технологічних пакувальних ліній. Відсутність конструкторських рішень в [1] для лінії в цілому не дає змоги узагальнити синтез ПТС пакувальної лінії. Будова і форма технологічної операції і технологічного потоку, тобто їх морфологія [2] — одне із нагальних питань в ПТС пакувального виробництва, але без підтвердження математичним моделюванням. Оцінка якості виробу, обладнання здійснюється з використанням відповідних показників [3; 4]: призначення надійності, технологічності, стандартизації та уніфікації не описані як сукупність основних характеристик окремого ФМ у складі ПТС. У [5] наведені можливі варіанти структурної динаміки складної структури потоково-технологічної технічної систем, не підкріплені програмно-математичним та інформаційним забезпеченням завдання організації структури ПТС.

**Метою дослідження** є розроблення й узагальнення теоретичних основ багатокритеріального структурно-параметричного синтезу ПТС пакувальних ліній харчових виробництв за заданими характеристиками, що ґрунтується на відборі на ранніх стадіях проектування раціональних параметрів ФМ для створення на їхній основі конкуренто спроможних зразків обладнання.

**Викладення основних результатів дослідження.** Розглянемо будову ПТС різної складності та вимоги до їхнього функціонування з метою встановлення критеріїв якості, функціональних, параметричних і критеріальних обмежень та обґрунтування методу багатокритеріального структурно-параметричного синтезу ФМ на підставі існуючих методів і методик [6—8].

Під час розроблення проекту ФМ у складі ПТС пакувальних ліній, його характеристики ідентифікують і документують у вигляді специфікацій, креслень, проектувальних розрахунків тощо. Визначають способи вимірювання і методи оцінки їх відповідності вимогам замовника та інших зацікавлених сторін. Значення цих характеристик використовують на наступному етапі — технологічній підготовці виробництва для визначення характеристик обладнання і послідовності технологічних дій під час виготовлення ФМ.

З математичної точки зору — це сукупність значень параметрів  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , які характеризують стан системи ФМ у певний момент часу  $t = t_0$ . Величини  $x_i$  можуть набувати довільних значень, причому двом різним наборам величин  $x_i$  і  $x_i'$  відповідають два різні стани. Позначимо ці параметри  $x_i, i = 1, \dots, n$ , причому кількість цих параметрів  $n$  може бути великою. Їх зручно об'єднати в один  $n$ -вимірний вектор або стовпець параметрів  $x_i$  (табл. 1).

*Таблиця 1. Дані, які характеризують стан системи ФМ у певний момент часу  $t = t_0$*

Вектор-стовпець даних		
про виріб	про процеси	про ресурси
$x_1 = \begin{vmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \dots \\ x_{1n} \end{vmatrix}$	$x_2 = \begin{vmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ \dots \\ x_{2n} \end{vmatrix}$	$x_3 = \begin{vmatrix} x_{31} \\ x_{32} \\ \dots \\ x_{33} \end{vmatrix}$

При цьому характеристики продукції і процесів мають бути простежуваними стосовно документованих вимог замовника та інших зацікавлених сторін. Тому зв'язок між процесами проектування і технологічної підготовки виробництва є двостороннім, оскільки часто потрібно відкоригувати характеристики виробу відповідно до існуючого обладнання і навпаки. Виготовлений виріб надходить замовникові або споживачеві, який використовує його, виходячи зі своїх потреб відповідно до тієї документації, яка супроводжує продукцію. Відношення між станами входів і виходів (спосіб дії процесу  $\phi$ ) будемо розглядати як математичне перетворення вектора  $X$  у вектор  $Y$  у вигляді  $Y = F(X)$ :

$$\phi: X \xrightarrow{F} Y, \quad \Pi: Res \rightarrow Prod, \quad (1)$$

де  $X, Y$  — відповідно, множина затрачених ресурсів та обсяг випущеної продукції. У процесі експлуатації проводиться оцінка відповідності характеристик виробу вимогам замовника. Інформація про відмови та інші недоліки, зміну умов застосування передається на етап проектування і розроблення, побічно впливаючи на технологічну підготовку виробництва. Взаємозв'язок між процесами дає змогу проводити вимірювання та аналіз даних, застосовувати коригувальні й запобіжні дії та методи запобігання втратам, щоб сприяти постійному поліпшенню поточних і майбутніх проектів, підвищувати їх ефективність. Контроль процесів передбачає контроль взаємодій, що сприяє усуненню конфліктів або непорозумінь. Процедура прийняття рішення здійснюється з урахуванням таких факторів: множина цілей (мотивів)  $M$ ; множина ресурсів (можливостей)  $X$ ; множина можливих ситуацій (станів)  $H$ . Під ситуацією  $h$  розуміють множину  $h = \{s; s_c\}$ , де  $s \in S$  — множина станів об'єкта, що приймає рішення;  $s_c \in S_c$  — множина станів середовища та об'єкта управління. Функціональна модель процесу прийняття рішення задається відображенням

$$\phi: H \cdot X \cdot M \rightarrow D, \quad (2)$$

яке кожній множині  $(h, x, m)$ , де  $h \in H$ ,  $x \in X$  і  $m \in M$ , ставить у відповідність рішення  $d$ , що належить множині допустимих рішень  $D$ .

Завдання знаходження необхідних ресурсів зводиться до побудови відображення  $\phi$  певної множини  $D$  (рішень) у деяку множину  $X$  (ресурси) на основі спостережуваної відповідності між окремими значеннями рішень і множиною можливих ситуацій

$$\phi: D \cdot H \rightarrow X. \quad (3)$$

Правило визначення якості рішення, що формується, записується як

$$\phi: [M / I, k_\tau, \chi] \cdot Y \cdot H \rightarrow Q, \quad (4)$$

де  $I$  — інформація, що використовується для прийняття рішень;  $k_\tau$  — коефіцієнт запасу часу ( $k_\tau = (t_y - \tau_p) / t_y$ ), де  $\tau_p$  та  $t_y$  — відповідно, час, що витрачається на формування рішення і на виконання операції виконання рішення;

$\chi$  — значущість рішень, що приймаються;  $Q$  — якість, яка досягається у результаті вибору рішень із множини  $D$ .

На підставі аналізу етапів проходження технологічних етапів розглянемо композицію таких рівнів (рис. 1):

- виріб як об'єкт експлуатації;
- виріб як об'єкт виготовлення;
- виріб як об'єкт удосконалення.

При цьому рівень експлуатації виробу є первинним, рівень виготовлення — вторинним, а рівень удосконалення — третинним. Рівні взаємозв'язані між собою за допомогою прямих і зворотних зв'язків, які забезпечують безперервні потоки інформації про умови експлуатації виробу (технологічної системи), а також про забезпечення властивостей виробу на рівні вдосконалення і виготовлення.

Такий підхід дає можливість урахувати всі функціональні особливості експлуатації виробу в процесі його виготовлення і вдосконалення.

Сучасні складні ФМ у складі ПТС пакувальних ліній можна розглядати як самостійно функціонуючі технічні системи. Сукупність характеристик виробу визначається типом, складом та якістю великої кількості елементів і підсистем, які взаємодіють між собою і об'єднані в систему для досягнення певної мети. Чим більша кількість елементів і підсистем, зв'язків між ними і станів, у яких вони можуть перебувати, тим більш складна технічна система.

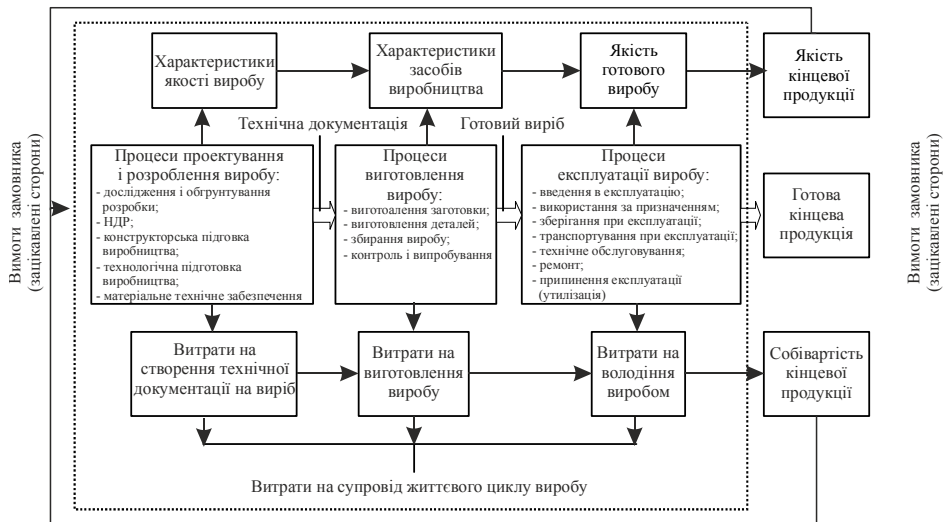


Рис. 1. Алгоритм формування ФМ в ПТС у складі пакувальної лінії

У свою чергу, проектування і виготовлення ФМ обладнання також здійснюється багатофункціональними і багатоелементними системами.

У складі ПТС пакувальної лінії у загальному випадку можуть бути виділені три різні компоненти [9] — комплекс технічних засобів (КТЗ), програмне забезпечення (ПЗ) і оперативний персонал (ОП).

Під комплексом технічних засобів будемо розуміти сукупність технічних пристроїв, взаємозв'язаних між собою для виконання виробничих завдань.

КТЗ класифікуватимемо за сферою застосування: спеціалізований, багатофункціональний, універсальний.

Програмним забезпеченням системи є сукупність програм (програмних засобів), які використовуються у складі системи в процесі її функціонування. Всі елементи ПЗ (засоби, програми) розділяються на групи за ознакою їх участі у виконанні тієї або іншої функції, в реалізації якої бере участь ПЗ. У результаті утворюються функціональні підсистеми ПЗ (ФППЗ). Під функцією ПЗ розуміють управління конкретними технічними (обчислювальними) засобами системи. Функціональні підсистеми ФППЗ можуть мати різну значущість для функціонування системи в цілому і відповідно характеризуватися різним рівнем вимог. У багатофункціональній системі ПЗ може брати участь у реалізації декількох функцій. При цьому у виконанні якої-небудь однієї функції можуть брати участь не всі програми (програмні засоби), що входять до складу ПЗ. Під оперативним персоналом розуміють категорію працівників, які безпосередньо впливають на органи управління, мають право експлуатаційного обслуговування і виконання оперативних переключень на обладнанні.

Основним завданням ОП у процесі функціонування системи вважається виконання певної, заздалегідь заданої процедури (послідовності операцій) при виникненні певних умов (заданої ситуації). У виконанні процедури можуть брати участь один або декілька операторів. Якість виконання ОП заданої процедури визначається рядом вимог (вимоги точності, швидкості, послідовності виконання операції тощо). Найбільш частим видом порушення нормального функціонування ОП є помилка у виконанні заданої процедури, що виявляється в невиконанні однієї або декількох вимог до якості процесу і продукції.

Названі три компоненти впливають на ефективність результату системи не ізольовано, а в тісному взаємозв'язку один з одним, що виражається у можливостях одного коригувати ефективність реалізацій функцій двома іншими. Між компонентами діють просторово — часові відношення.

У зв'язку з тим, що системи є багатофункціональними і виконувани ними функції можуть істотно відрізнитися, при розгляді багатьох питань використовується функціональний підхід. При цьому для розгляду питань за певною ( $j$ -ю) функцією із складу всіх елементів виділяється група технічних, програмних і ергатичних (людина-оператор або група операторів, персонал) елементів, що беруть участь у виконанні даної функції (рис. 2).

Ця група елементів утворює  $j$ -ту функціональну підсистему ( $j$ -та ФПС або ФПС $_j$ ) даної системи. Саме ця ФПС $_j$  підлягає аналізу при розгляді характеристик системи відносно тієї, що реалізується нею  $j$ -ту функцію.

До складу ФПС $_j$  (як і до складу системи в цілому) в загальному випадку входять три компоненти:

- група технічних засобів, що беруть участь у реалізації  $j$ -ї функції ( $j$ -та функціональна підсистема КТЗ — ФПКТЗ $_j$ );
- група програмних засобів, які беруть участь у реалізації  $j$ -ї функції ( $j$ -та функціональна підсистема ПЗ — ФППЗ $_j$ );
- група ергатичних засобів, які беруть участь у реалізації  $j$ -ї функції ( $j$ -та функціональна підсистема ОП — ФПОП $_j$ ).

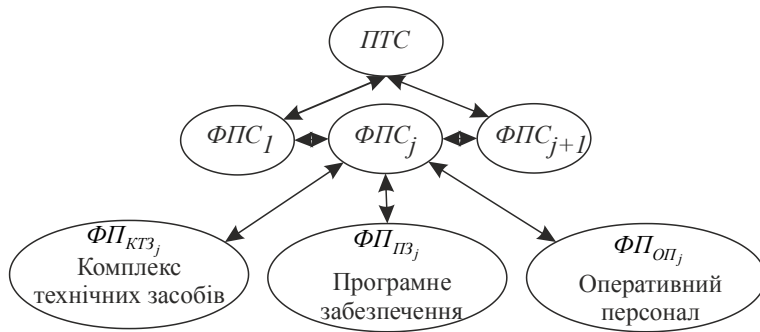


Рис. 2. Функціональні модульні підсистеми

Функціональні підсистеми виділяються за ознакою участі у виконанні деякої функції: за конструктивними ознаками можуть виділятися конструктивні підсистеми, за інформаційними ознаками — інформаційні підсистеми тощо. Аналіз функціонування системи істотно спрощується, якщо її структура побудована так, що підсистеми, які виділяються за функціональними і конструктивними ознаками, збігаються. За характером процесу виконання функції системи поділяються на безперервно виконувані (*H*-функції) та дискретно виконувані (*D*-функції). Однією з найважливіших складників якості сучасної системи, яка значною мірою визначає ефективність її функціонування у реальних умовах експлуатації, є надійність. Для переважної більшості розглядуваних систем основними складовими надійності є складові безвідмовності та ремонтпридатності.

Саме рівень безвідмовності та ремонтпридатності системи безпосередньо впливає на показники її продуктивності, економічності, ефективності й безпечності та значною мірою визначає низку найважливіших технічних і економічних чинників (таких, як необхідний обсяг запасних інструментів та приладів (*ЗИП*), кількість експлуатаційного та ремонтного персоналу).

Усі групи засобів можуть бути диференційовані на дві множини елементів функціональної підсистеми: готових на момент часу *t* до оперативного використання і неготових. На множині неготових до оперативного використання щодо системи, що задає функції виділяються засоби двох видів: стримувальні й критичні. У системі засобів можуть бути елементи, які, з одного боку, забезпечують заданий діапазон параметрів, що визначають ефективність виконання заданої функції, а з іншого — виходять за нормативний період часу її реалізації, тобто засіб, неготовий до оперативного використання. Якщо заданий діапазон параметрів забезпечується лише цим засобом, то він є стримувальним. У тому разі якщо відносно певної функції існує лише один тип засобів, здатних виконувати цю функцію, і вони належать до стримувальних, то він є критичним.

У результаті множина елементів системи засобів може бути подана як

$$\Phi\Pi = \Phi\Pi^{\Gamma} \cup \Phi\Pi^{\Gamma*} \cup \Phi\Pi^{\Gamma*,C}, \quad (5)$$

де  $\Phi\Pi^{\Gamma}$  — множина елементів, готових до оперативного використання на момент часу *t*;  $\Phi\Pi^{\Gamma*}$  — множина елементів, неготових до оперативного



використання (стримувальні елементи);  $\Phi\Pi\Pi^*$ ,  $C$  — множина критичних елементів системи засобів.

Комплексними показниками готовності  $\Phi\Pi\Pi$  є: коефіцієнт готовності ( $K_T$ ) і коефіцієнт оперативної готовності ( $K_{OT}$ ), які визначаються за формулами:

$$K_T(t) = \frac{T_0(t)}{[T_0(t) + T_B(t)]}; \quad (6)$$

$$K_{OT}(t) = K_T(t)e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

де  $T_0(t)$  — середнє напрацювання  $\Phi\Pi\Pi$  між відмовами на довільний момент  $t$  (сумарне напрацювання);  $T_B(t) = TB$  — середній час відновлення здатності системи до виконання функцій після відмови;  $\lambda$  — інтенсивність відмов.

Оцінка надійності функціонування персоналу містить імовірність безвідомовної роботи окремого виконавця з урахуванням надійності зв'язаних із ним технічних засобів та інформаційного забезпечення (програмних засобів):

$$P_{\Phi\Pi\Pi} = (P_0 P_1 [P_2(1 - P_0) + P_0] P_3(1 - P_4)) [1 - P_{\Phi\Pi\Pi KT} (1 - P_0)]^2, \quad (8)$$

де  $P_i$  — імовірність;  $P_0$  — виконання персоналом необхідних дій;  $P_1$  — своєчасний прийом і обробка інформації програмним забезпеченням;  $P_2$  — правильне рішення, прийняте персоналом;  $P_3$  — правильна реалізація рішень;  $P_4$  — реалізація контролю, у тому числі самоконтролю;  $P_{\Phi\Pi\Pi KT}$  — імовірність відмови технічних засобів.

Опис надійності багатофункціональної системи проводиться за кожною функцією (за кожною  $\Phi\Pi\Pi$ ) окремо. Розв'язання задачі проектної оцінки надійності системи, що має  $N$  функцій, зводиться до  $N$ -разового повторення розв'язання задачі для однієї  $\Phi\Pi\Pi$ . Наявність у  $\Phi\Pi\Pi$  трьох компонентів (приватних підсистем —  $\Phi\Pi\Pi KT$ ,  $\Phi\Pi\Pi O$  і  $\Phi\Pi\Pi P$ ), відмови (помилки) кожного з яких можуть викликати відмову  $\Phi\Pi\Pi$  у цілому, зумовлює декілька видів відмов. Компоненти  $\Phi\Pi\Pi$  у цілому впливають на її результуючу надійність у тісному взаємозв'язку один із одним. Ця взаємодія обумовлюється взаємостійкістю (взаємною відмовостійкістю) компонентів. Принцип поетапної побудови оптимальної компоновки ПТС пакувальної лінії на основі окремих ФМ, базується на методиках і алгоритмі оптимального управління на основних стадіях синтезу ПТС. Алгоритм містить такі етапи:

1) записується функціональне рівняння для останнього етапу (рис.3) ( $l = k - 1$ ):

$$f_1(X_{\Phi\Pi\Pi k-1}) = \max_{U_k} [E_k(X_{\Phi\Pi\Pi k-1}, U_k) + f_0(X_{\Phi\Pi\Pi k})];$$

2) знаходиться  $E_k(X_{\Phi\Pi\Pi k-1}; U_k)$  з дискретного набору його значень при деяких фіксованих  $X_{\Phi\Pi\Pi k-1}$  і  $U_k$  з відомих допустимих областей, оскільки  $f_0(X_{\Phi\Pi\Pi k}) = 0$ , то  $f_1(X_{\Phi\Pi\Pi k-1}) = \underset{U_k}{optimum} [E_k(X_{\Phi\Pi\Pi k-1}, U_k)]$ . У результаті після першого кроку буде відоме рішення  $U_k$  і значення функції  $f_1(X_{\Phi\Pi\Pi k-1})$ ;

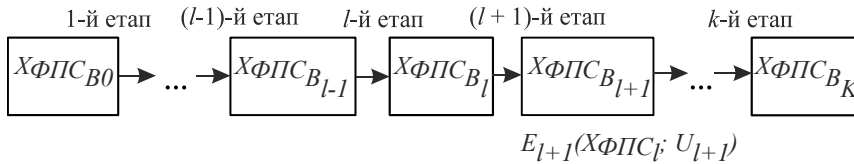
3) зменшуючи значення  $l$  на одиницю, записується відповідне функціональне рівняння. При  $l = k - n$  ( $n = \overline{2, k}$ ) воно має вигляд:

$$f_n(X_{\Phi PC_{k-n}}) = \max_{U_{k-n+1}} \left[ E_{k-n+1}(X_{\Phi PC_{k-n}}, U_{k-n+1}) + f_{k-1}(X_{\Phi PC_{k-n+1}}) \right]; \quad (8)$$

4) знаходиться умовно-оптимальне рішення;

5) перевіряється значення  $l$ . Якщо  $l = 0$ , то підрахунок умовно-оптимального розв'язку завершено. При цьому знайдене оптимальне рішення для першого стану  $\Phi PC_B$ . Якщо  $l \neq 0$ , то необхідно перейти до виконання п. 3;

6) розраховується оптимальний розв'язок для кожного наступного кроку, рухаючись від кінця розрахунків до початку.



**Рис. 3. Принцип поетапної побудови оптимального управління**

Використання моделі вибору ефективних режимів реалізації сумісної взаємодії функціональних модульних підсистем дає змогу оцінити кожен варіант конструкції машинобудівного виробу з точки зору витрат на його проектування, виготовлення і експлуатацію. Аналізуючи переваги і недоліки цих варіантів, вибирають найбільш оптимальний з точки зору ринкової кон'юнктури. Стан виробу на етапах побудови ПТС можна подати у вигляді схеми, яка показана на рис. 4. Розглянемо описану методику на дослідженні структурно-параметричної моделі ФМ механізму амортизації плівки пакувальної машини. Згідно з підходом структурно-параметричного моделювання (СПМ) виробу склад елементів ФМ (рис. 4) може бути визначений множиною [10]:

$$\Phi M = \{ \Phi M_1, \Phi M_2, \dots, \Phi M_i \}, \quad (9)$$

де  $i$  — кількість елементів пакувальної машини.

У цьому випадку ( $N_2 = 5$ )

$$\Phi M_2 = \{ \Phi M_1, \Phi M_2, \Phi M_3, \Phi M_4, \Phi M_5 \} = \{ P, PMK, ППР, П, РП \}. \quad (10)$$

У свою чергу, ці елементи діляться на частини:

$$C = \{ PK, PC \}, \quad PMK = \{ PRM, DM \}, \quad ППР = \{ MP, BP \}, \\ RP = \{ MPP, KMPP \}, \quad П = \{ PE, PP, K \}, \quad (11)$$

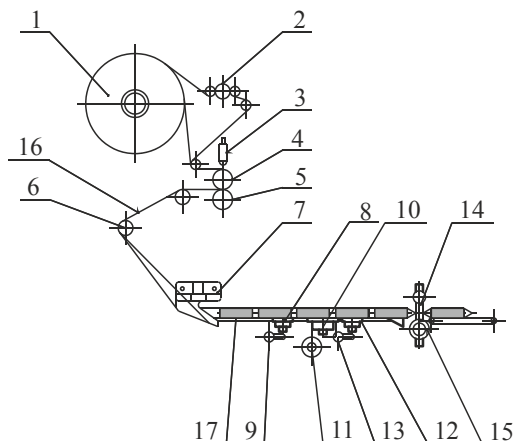
де  $PK, PC$  — відповідно конструкція і матеріал рулонотримача, конструкція станини рулонотримача;  $PRM, DM$  — вид привода ролика маркіратора, тип дешифратора мітки;  $MP, BP$  — механізм притискання, конструкція притискної балки;  $MPP, KMPP$  — механізм руху ролика, конструкція механізму руху

ролика; *ПЕ* — поліетиленовий пакувальний матеріал, *ПП* — поліпропіленовий пакувальний матеріал, *К* — композиційний пакувальний матеріал.

Склад об'єкта, що моделюється на рівні  $n=3$ , можна визначити множиною:

$$\Phi M_3 = \left\{ \{PK, PC\}, \{PRM, DM\}, \{MP, BP\}, \{MPP, KMPP\}, \{PE, PP, K\} \right\}, (12)$$

де  $N_3 = 11$  — кількість елементів  $\Phi M$  пакувальної машини на рівні  $n = 3$ .



**Рис. 4. Структурно-параметрична модель окремого функціонального модуля пакувальної машини ( $\Phi M$ ):** 1 — рулонотримач (*P*); 2 — ролик маркувальника кодів (*PMK*); 3 — фотодатчик; 4 — притискний приводний ролик (*ЛПР*); 5 — ролик прогумований (*РП*); 6 — ролик, який коливається (амортизуючий/акумуляуючий); 7 — формоутворювач рукава плівки; 8 — протягувальний ролик; 9 — ручка протягувального ролика; 10 — механізм захоплення; 11 — пристрій регулювання швидкості; 12 — запресовувальний ролик; 13 — ручка запресовувального ролика; 14 — верхній механізм для формування шва та розрізання; 15 — нижній механізм для формування шва та розрізання; 16 — пакувальна плівка (*П*); 17 — продукт

Для кожного елемента  $\Phi M$  пакувальної машини матимемо таку множину варіантів:

$$\begin{aligned} PK &= \{PK_i\}_1^{NPK}, PC = \{PC_i\}_1^{NPC}, \\ PRM &= \{PRM_i\}_1^{NPRM}, DM = \{DM_i\}_1^{NDM}, \\ MP &= \{MP_i\}_1^{NMP}, BP = \{BP_i\}_1^{NBP}, MPP = \{MPP_i\}_1^{NMPP}, \\ KMPP &= \{KMPP_i\}_1^{NKMPP}, PE = \{PE_i\}_1^{NPE}, PP = \{PP_i\}_1^{NPP}, K = \{K_i\}_1^{NK}, \end{aligned} (13)$$

де  $NPK = 2$ ;  $NPC = 3$ ;  $NPRM = 2$ ;  $NDM = 3$ ;  $NMP = 3$ ;  $NBP = 2$ ;  $NMPP = 3$ ;  $NKMPP = 2$ ;  $NPE = 1$ ;  $NPP = 1$ ;  $NK = 1$  відповідне число варіантів.

Тоді в даному випадку

$$\Phi M = \left\{ \Phi M_i \right\}_1^{N_4}, (14)$$

де  $N_4 = NPK + NPC + NPRM + NDM + NMP + NBP + NMPP + NKMPP + NPE + NPP + NK = 23$  — загальне число варіантів окремих елементів пакувального модуля машини.

**Висновок**

Пакувальна машина як об'єкт моделювання може бути зображена у вигляді ієрархічної нерегулярної структури, яка є кінцевим неорієнтованим єднальним графом із вершиною входу ФМ (тобто деревом із окремими гілками рішень). На базі таких структурно-параметричних моделей можна не тільки відображати властивості та структуру складного технічного об'єкта, що проектується, яким є ФМ, але й ефективно проводити його аналіз, синтез і оптимізацію. Для оптимізаційних рішень доцільно застосовувати прикладні програмні продукти, наприклад AnyLogic. Такий підхід дає змогу не тільки дослідити можливі компоновочні рішення ФМ, а й опрацювати їх доцільність методами комп'ютерного моделювання технологічного процесу. У процесі проектування використовується системно-ієрархічний підхід, при якому ФМ розглядається як складна система зв'язаних і взаємодіючих між собою частин блоково-ієрархічної структури, що складається з різних рівнів. Аналіз взаємодії рівней в просторі ПП AnyLogic проведено на прикладі оптимізаційної моделі ФМ пакувальної машини. Результатом проведених досліджень є створення фізичної моделі з раціональними параметрами для технологічного процесу.

**Література**

1. Дядюра К.А. Управление качеством механической обработки резанием на основе информации технической диагностики / К.А. Дядюра, В.В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — Сумы, 2011. — № 2(24)— С. 44—49.
2. Малкин А.Я. Реология. Концепции, методы, приложения / А.Я. Малкин, А.И. Исаев — Изд-во: Профессия, 2007. — 560 с.
3. Проников А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 560 с.
4. Залого В.А. Синергетическая картина непрерывного перехода между режимами реализации машиностроительного изделия / В.А. Залого, К.А. Дядюра, О.В. Ющенко и др. // SaTCIP — Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI), Vol. 1, # 1, pp. 77, 2009.
5. Jonsson M, Andersson C, & Stahl J. E. A general economic model for manufacturing cost simulation: proceedings of the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May (2008). Tokyo, 26—28.
6. Muthiah K.M.N, & Huang S.H. A review of literature on manufacturing systems productivity measurement and improvement. International Journal of Industrial Engineering (2006), 2006, 1—461.
7. Huang S.H, Dimukes J.P, Shi J, Su Q, Razzak M.A, & Robinson D.E. Manufacturing system modeling for productivity improvement. Journal of Manufacturing Systems (2002), 2002, 21—249.
8. Swic A., Gola A. (2010), Elements of design of production systems — methodology of machine tool selection in casing-class FMS. Management and Production Engineering Review, 1(2), pp. 78—80.
9. ДСТУ 3524-97 Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення.
10. Залого В.А. Функциональный подход к проектированию машиностроительного изделия / В.А. Залого, К.А. Дядюра // Збірник наукових праць НТУ «ХП» Високі технології в машинобудуванні. — Харків, 2010. — Вип. 2 (16). — С. 22—30.