

**Грибков С. В.**, к.т.н., доцент,  
доцент кафедри інформаційних систем,  
**Харкянен О. В.**, к.т.н., доцент,  
доцент кафедри інформаційних систем,  
Національний університет харчових технологій  
**Гладка Ю. А.**, к.ф.-м.н., доцент,  
доцент кафедри комп'ютерної математики та інформаційної безпеки,  
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

**Hrybkov S. V.**, PhD, Associate Professor,  
Department of Information Systems,  
**Kharkianen O. V.**, PhD, Associate Professor,  
Department of Information Systems,  
National University of Food Technologies  
**Gladka Y. A.**, PhD, Associate Professor,  
Department of Computer Mathematics and Information Security,  
SHEI KNEU named after V. Hetman

## ВИКОРИСТАННЯ ЕВРИСТИЧНИХ І ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ

### APPLICATION OF HEURISTIC AND EVOLUTIONARY ALGORITHMS TO MANAGEMENT PROBLEMS

**Анотація.** У статті висвітлено нові наукові результати, а саме математичну модель планування виконання замовлень, а також запропоновано модифікований алгоритм LBA, що забезпечує формування альтернативних планів виконання замовлень, з урахування запропонованої математичної моделі. В роботі наведено математичну модель задачі формування виробничих завдань на харчових підприємствах, що враховує сім часткових критеріїв. Загальна оціночна функція у математичній моделі представлена адитивною згорткою усіх критеріїв. Математична модель є комбінаторною багатокритеріальною NP-повною задачею, що враховує низку обмежень: загальний обсяг виготовлення продукції не повинен бути більшим, ніж потужність підприємства на заданій період; не можливо порушувати вимоги та терміни зберігання сировини та матеріалів; не можливо порушувати вимоги та терміни зберігання готової продукції; на певний проміжок часу дозволено використовувати кожне технологічне обладнання для виготовлення тільки одного виду продукції чи напівфабрикату, адже не можливо використовувати технологічне обладнання для одночасного виготовлення різних видів продукції за різними рецептурами та компонентним складом. На основі проведених досліджень зроблено висновок щодо доцільності використання метаевристичних популяційних алгоритмів кажанів і його модифікації, а також модифікованого алгоритму косяка риб. У роботі наведено загальні етапи роботи алгоритмів кажанів і його модифікації, а також модифікованого алгоритму косяка риб. У результаті досліджень, що проводились на статистичних даних різних підприємств харчової галузі, обґрунтовано вибір алгоритму кажанів на основі стратегії пошуку польотів Levy. Даний алгоритм забезпечує формування альтернативних планів вико-

нання замовлень, застосування яких дозволяє формувати нові та проводити реконфігурації існуючих планів за короткий проміжок часу. У випадку, якщо при прийнятті рішення є можливість виключити з математичної моделі один з часткових критеріїв, то ефективнішим себе показав модифікований алгоритм на основі комбінації алгоритмів косяку риб і зграї сірих вовків. У статті висвітлено нові наукові результати, а саме математичну модель планування виконання замовлень, а також запропоновано модифікований алгоритм LBA, що забезпечує формування альтернативних планів виконання замовлень, з урахуванням запропонованої математичної моделі.

**Ключові слова:** математична модель, планування виконання замовлень, комбіновані алгоритми, алгоритм кажанів, алгоритм зграї сірих вовків, алгоритм косяка риб.

**Abstract.** The article highlights new scientific results, namely the mathematical model of order execution planning, and also proposes a modified LBA algorithm that provides the formation of alternative order execution plans, taking into account the proposed mathematical model. The paper presents a mathematical model of the problem of forming production tasks at food enterprises, which takes into account seven partial criteria. The general estimation function in the mathematical model is represented by an additive convolution of all criteria. The mathematical model is a combinatorial multicriteria NP-complete problem that takes into account a number of limitations: the total volume of production should not be greater than the capacity of the enterprise for a given period; it is not possible to violate the requirements and terms of storage of raw materials; it is not possible to violate the requirements and terms of storage of finished products; for a certain period of time it is allowed to use each technological equipment for the manufacture of only one type of product or semi-finished product, because it is not possible to use technological equipment for the simultaneous manufacture of different products according to different recipes and components. On the basis of the conducted researches it was found that metaheuristic population bat algorithm and its modifications and the modified algorithm of a fish shoal are suitable for the task. The general stages of operation of bat algorithms, modified bat algorithm, and the modified algorithm of a fish shoal are presented. As a result of research conducted on the statistics of various food companies, the choice of bat algorithm based on Levy's flight search strategy was substantiated. This algorithm provides the formation of alternative plans for the execution of orders, the use of which allows you to generate new and reconfigure existing plans in a short period of time. If it is possible to exclude from the mathematical model one of the partial criteria when making a decision, then a modified algorithm based on a combination of algorithms of a fish shoal and a pack of gray wolves proved to be more effective. The article highlights new scientific results, namely the mathematical model of order execution planning, and also proposes a modified LBA algorithm that provides the formation of alternative order execution plans, taking into account the proposed mathematical model.

**Keywords:** mathematical model, order execution planning, combined algorithms, bat algorithm, gray wolf optimizer algorithm, fish shoal algorithm.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Підприємства харчової галузі є стратегічними у багатьох країнах. Їх робота залежить від попиту споживачів, сезонного коливання цін на енергоресурси, сировину і допоміжні матеріали, заробітної платні працівників, рівня інфляції тощо. Постійна конкуренція на ринку харчової продукції в умовах невизначеності і ризику вимагає від

виробників вдосконалення процесу оперативного управління всіма ланками харчового підприємства. Традиційними методами не завжди можна забезпечити швидке реагування на зміни ринкової ситуації і здійснювати управління в режимі реального часу.

Основним завданням управління є забезпечення виготовлення продукції в повному обсязі і асортименті для задоволення потреб замовників на заданий час. Таке завдання належить до класу багатокритеріальних NP-складних комбінаторних задач [1, 2].

Важливість задач прийняття рішень та їх складність на різних рівнях управління обумовлює необхідність створення інформаційної технології прийняття рішень на основі модифікованих евристичних і еволюційних методів та алгоритмів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [Hrybkov, and etc., 2020] запропоновано інформаційну технологію для розв'язання задачі планування виконання замовлень по виготовленню продукції на харчових підприємствах, яка ґрунтується на комбінуванні алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків і генетичного. Але запропонована технологія може бути застосована до складних задач і може вимагати великих ресурсозатрат.

У роботі [Hrybkov, and etc., 2018] авторами запропоновано математичну модель задачі планування виконання договорів і метод мурашиної колонії для її розв'язання. Використання запропонованих алгоритмів неможливе без застосування інформаційних систем, тому у роботі [Hrybkov, and etc., 2018] запропоновано структуру web-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) при плануванні виконання договорів, а також розглянуто технології для її практичної реалізації. Але недоліком запропонованого підходу є їх орієнтованість на підприємства з надання послуг, що не дозволяє врахувати обмеження на обсяги необхідної для виготовлення харчової продукції сировини та пакувальних матеріалів, терміни зберігання готової продукції.

Робота [Santosh, Vinod 2015] присвячена використанню генетичних алгоритмів для вирішення задач оптимізації управління та планування промислових процесів, але не розглянуто особливості окремих галузей виробництва.

У дослідженні [Yang-Kuei Lin 2018] наведено математичну модель, яка враховує лише деякі критерії ефективності при плануванні виконання операцій на різних технологічних машинах. Але розглянутий методу гілок і границь має складності при вирішенні задач для обладнання, яке використовується паралельно.

**Виділення невирішених раніше задач.** Сьогодні при вирішенні задач складання оперативно-календарних планів і при ви-

рішенні виробничих задач використовують так званий метод декомпозиції цілей. Згідно з ним, відбувається локальне розв'язання задач без урахування усіх факторів, що можуть у подальшому вплинути на діяльність підприємства. Більшість сучасних інформаційних систем направлені на підтримку управління виробництвом, ресурсами, автоматизацію планування, обліку, контролю та аналізу всіх бізнес-операцій підприємства. А зв'язок між відділами забезпечується за рахунок використання корпоративних баз і сховищ даних.

Планування виконання замовлень на основі використання класичних, евристичних та еволюційних методів розглядалась різними науковцями, але задача досі залишається актуальною. Підприємства повинні виготовляти продукцію відповідно до вимог замовника, оптимізуючи собівартість виробництва. Здійснення управління всіма ланками підприємства повинно бути узгодженим, що не можливо досягти використовуючи стандартні методи управління. Їх застосування призводить до витрат часових ресурсів, що не відповідає потребам управління підприємством в реальному часі. Все це обумовлює розробку та створення інтелектуальних інформаційних систем нового покоління, які використовують евристичні, еволюційні та мультиагентні методи й підходи інтелектуальної оптимізації, в основі яких лежить моделювання колективного інтелекту суспільних тварин, комах та інших живих істот. За рахунок використання сучасних інформаційних систем такі методи дають хороші результати у розв'язанні різних задач оптимізації, що свідчить про перспективність даного напрямку [3].

Проведений аналіз наведених вище літературних джерел дає підстави стверджувати про доцільність створення інформаційної технології з використанням модифікованих мультиагентних і генетичних алгоритмів для розв'язання задачі планування виконання замовлень по виконанню замовлень.

**Формулювання цілей статті.** Основними цілями даної роботи є два завдання:

— формалізація та математичне моделювання виконання замовлень, що враховує усі критерії впливу на отримання кінцевого прибутку;

— обрання та обґрунтування вибору модифікованих алгоритмів розв'язання задачі формування оптимальних варіантів розкладу виконання замовлень.

Виклад основного матеріалу.

Розробка математичної моделі планування виконання замовлень.

Для математичної моделі задачі складання розкладу виконання замовлень введемо такі позначення:

$t$  — час початку виконання плану, який позначається датою і часом до хвилини;

$\Delta t$  — час, за який необхідно виконати усі замовлення в хвилинах;

$(t+\Delta t)$  — плановий період, на який розраховується виробничий план;

$i$  — замовлення, що знаходиться на черзі, регламентує один вид продукції, яку необхідно виготовити за період  $(t+\Delta t)$ ;

$j$  — номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -о замовлення, де  $\omega_i$  — кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;

$l$  — номер обладнання з множини обладнання ( $j \in \sigma_i$ ) для  $i$ -о замовлення, де  $\sigma_i$  — кількість задіяного обладнання для виконання усіх етапів при виготовленні  $i$ -го замовлення;

$t_i$  — час початку виконання виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;

$\Delta t_{ijl}$  — час виконання  $j$ -о етапу на  $l$ -у обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;

$pt_{ijl}$  — час необхідний для підготовки  $l$ -о обладнання для здійснення  $j$ -о етапу при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням, може приймати значення нуль, якщо підготовка не потрібна;

$\eta t_{ijl}$  — час для очищення обладнання після  $j$ -о етапу виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням на  $l$ -у обладнанні.

$o_{ijl}$  — параметр, що приймає значення  $\{0, 1\}$  ( $o_{ijl} = 1$ , якщо  $j$ -й етап можливо виконати на  $l$ -у обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  $o_{ijl} = 0$  в іншому випадку);

$n$  — загальна кількість замовлень, які необхідно виконати за період  $(t+\Delta t)$ ;

$\theta_i$  — параметр, що приймає значення  $\{0, 1\}$  ( $\theta_i = 1$ , якщо  $i$ -е замовлення виконується за період  $(t+\Delta t)$ ;  $\theta_i = 0$  в іншому випадку);

$sd_i(t+\Delta t)$  — вартість одиниці продукції для  $i$ -о замовлення за період  $(t+\Delta t)$ ;

$vc_i(t+\Delta t)$  — постійні витрати на виготовлення одиниці продукції для  $i$ -о замовлення за період  $(t+\Delta t)$ ;

$vz_i(t+\Delta t)$  — змінні витрати на виготовлення одиниці продукції для  $i$ -о замовлення за період  $(t+\Delta t)$ ;

$op_i(t+\Delta t)$  — обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовленням у період  $(t+\Delta t)$ ;

$g_i$  — розмір штрафу прописаний у договорі, який необхідно відшкодувати замовнику, якщо буде порушено  $dt_i$  термін виконання замовлення;

$\Psi_i$  — коефіцієнт, що приймає значення  $\{0,1\}$ ,  $\Psi_i=1$  якщо  $(t_i+F_{2i}(t+\Delta t))<dt_i$ ,  $\Psi_i=0$  в іншому випадку, та визначає необхідність відшкодування замовнику, якщо буде порушено термін виконання  $dt_i$ ;

$r_i$  — перелік ресурсів необхідних для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;

$\omega_i$  — кількість технологічних етапів для виконання  $i$ -го замовлення;

$hk_i$  — коефіцієнт, який враховує необхідність сплати штрафу за запізнення на кожну добу;

$\sigma_i$  — кількість задіяного обладнання для виконання усіх етапів при виготовленні  $i$ -го замовлення;

$to_{ij-1}$  — час переходу/очікування між виконанням  $j$ -о етапу до  $(j-1)$  етапу;

$c_{ijl}$  — витрати за одну годину при здійсненні  $j$ -о етапу на  $l$ -у обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;

$cn_{ijl}$  — вартість перероблення чи утилізації одиниці отриманої некондиційної продукції при виконанні  $i$ -о замовлення на  $l$ -у технологічному обладнанні;

$vnk_{ijl}$  — загальна кількість некондиційної продукції, отриманої на кожну одиницю продукції під час виконання  $j$ -о етапу  $i$ -о замовлення на  $l$ -у технологічному обладнанні;

$dt_i$  — час, за який необхідно виготовити продукцію за  $i$ -м замовленням;

$k$  — вид сировини (матеріалу), необхідного для виконання  $i$ -о замовлення, а загальна його кількість необхідних для виконання  $i$ -о замовлення  $r_i$ ;

$rk_{ik}$  — обсяг сировини, необхідний для виготовлення одиниці продукції за  $i$ -м замовленням;

$rt_{ik}$  — час надходження  $k$ -о компонента для виконання  $i$ -о замовлення;

$vsr_{ik}$  — вартість зберігання  $k$ -о компонента для виконання  $i$ -о замовлення.

Визначаємо такі часткові критерії ефективності варіанту плану для м'ясопереробного підприємства:

1) максимальний прибуток отриманий при виконанні усіх замовлень за плановий період  $(t+\Delta t)$ :

$$F_1(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n (\theta_i * (sd_i(t + \Delta t) - (vc_i(t + \Delta t) + vz_i(t + \Delta t)))) * op_i(t + \Delta t) \rightarrow \max; \quad (1)$$

2) мінімізація часу на виготовлення продукції кожного  $i$ -о замовлення за період  $(t+\Delta t)$  (2), а також обмеження (3) та (4), що

регламентують час виготовлення кожної продукції для  $i$ -о замовлення, та обмеження на термін закінчення виготовлення продукції повинні не перевищувати визначеного терміну:

$$F_2(t + \Delta t) = \max_i (F_{2i}(t + \Delta t)) = \max_i \left( \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} (o_{ijl} * (pt_{ijl} + t_{ijl} + \eta t_{ijl} + to_{ij-1})) \right) \rightarrow \min ; \quad (2)$$

$$t \leq t_i + F_{2i}(t + \Delta t) \leq t + \Delta t ; \quad (3)$$

$$t \leq t_i - F_{2i}(t + \Delta t) \leq dt_i ; \quad (4)$$

3) мінімізація сумарних штрафів за невчасне виконання замовлення за період  $(t + \Delta t)$ :

$$F_3(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n (g_i * \psi_i * hk_i) \rightarrow \min ; \quad (5)$$

4) мінімізація сумарних витрат при проходженні усього технологічного процесу через відповідні технологічні ділянки при виконанні замовлень за заданий період  $(t + \Delta t)$ :

$$F_4(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} ((o_{ijl} * (pt_{ijl} + t_{ijl} + \eta t_{ijl})) * c_{ijl}) \right) \rightarrow \min ; \quad (6)$$

5) мінімізація витрат на переробку та утилізацію отриманої некондиційної продукції при виконанні усіх замовлень:

$$F_5(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} (o_{ijl} * cn_{ijl} * vnk_{ijl} * op(t + \Delta t)) \rightarrow \min ; \quad (7)$$

6) мінімізація витрат на зберігання готової продукції до заданого терміну відвантаження:

$$F_6(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n (vz_i * op(t + \Delta t) * \max(0, dt_i - (t_i + F_{2i}(t + \Delta t))) \rightarrow \min ; \quad (8)$$

7) мінімізація витрат на зберігання сировини та матеріалів, що необхідні для виготовлення продукції:

$$F_7(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r_i} (vsr_{ik} * rk_{ik} * op(t + \Delta t) * \max(0, t_i - rt_{ik})) \rightarrow \min . \quad (9)$$

Загальна оціночна функція буде представлена адитивною згортокою усіх критеріїв:

$$F'_0 = \lambda_1 F_1 - \sum_{\gamma=3}^7 \lambda_\gamma F_\gamma \rightarrow \max , \quad (10)$$

де  $\lambda_\gamma$  — коефіцієнт важливості критерію  $\lambda_\gamma \in [0, 1]$ .

Якщо  $\lambda_l=0$ , то загальна оціночна функція приймає вигляд:

$$F'_0 = \sum_{\gamma=3}^7 \lambda_\gamma F_\gamma \rightarrow \min. \quad (11)$$

Залежно від соціальної та економічної ситуації, а також досвіду менеджера, який відповідає за складання оперативного календарного плану виконання замовлення, задача може вирішуватись за різними варіантами.

Математична модель є комбінаторною багатокритеріальною NP-повною задачею. Вона включає низку обмежень: загальний обсяг виготовлення продукції не повинен бути більшим, ніж потужність підприємства на заданий період; не можливо порушувати вимоги та терміни зберігання сировини та матеріалів; не можливо порушувати вимоги та терміни зберігання готової продукції; на певний проміжок часу дозволено використовувати кожне технологічне обладнання для виготовлення тільки одного виду продукції чи напівфабрикату, адже не можливо використовувати технологічне обладнання для одночасного виготовлення різних видів продукції за різними рецептурами та компонентним складом.

На підставі проведених досліджень літературних джерел зроблено висновок щодо доцільності використання метаевристичних популяційних алгоритмів кажанів і його модифікації, а також модифікованого алгоритму косяка риб.

*Алгоритм кажанів і його модифікації.*

До особливостей поведінки кажанів під час полювання відносять спроможності активно збирати інформацію і дуже швидко приймати рішення. Для орієнтації в просторі кажани використовують ехолокацію — вони випускають ультразвук, який досягає жертви і відбивається назад. Більшість видів кажанів володіє доскональними засобами ехолокації, які використовуються ними для виявлення здобичі і перешкод, а також для забезпечення можливості розміститися на поверхні в темряві. Завдяки ехолокації кажан визначає розташування жертви та здійснює напад. Кажан приймає рішення про свої дії у просторі дуже швидко на основі отриманої інформації із зовнішнього середовища. Однією з основних переваг алгоритму кажанів є швидкість виконання і потенційно більша потужність, ніж в алгоритмі рою частинок. Алгоритм може здатися складнішим, ніж більшість інших алгоритмів ройового інтелекту, проте, він може бути досить ефективно застосований до задач оптимізації та забезпечити пошук оптимальних результатів, витрачаючи меншу кількість часу [Suganthi, 2017].



Алгоритм кажанів дотримується таких правил:

— усі кажани використовують ехолокацію, щоб аналізувати відстань, а також відрізнити їжу та природні перешкоди;

— кажани переміщуються випадковим чином зі швидкістю  $v_i$  в позиції  $x_i$  з фіксованою частотою  $f_{min}$ , змінною довжиною хвилі  $\lambda$  і гучністю  $A_0$ , щоб знайти здобич;

— кажани можуть автоматично регулювати довжину хвилі (або частоту, оскільки частота = 1/довжина хвилі), випускання імпульсу і швидкість імпульсу  $r_i$  [0,1], що залежать від відстані до певного об'єкту або здобичі;

— показник гучності змінюється від більш (позитивного)  $A_0$  до меншого постійного значення  $A_{min}$ .

Враховуючи, що швидкість звуку в повітрі приблизно дорівнює 300 м/с, довжина хвилі для звуку з постійною частотою визначається формулою:

$$\lambda = \frac{v}{f} . \quad (12)$$

Кажани використовують затримку від випромінювання сигналу, до виявлення відлуння, різницю в часі виявлення відлуння в двох вухах, для того щоб побудувати тривимірну модель оточуючого простору. Використовуючи побудовану модель вони виявляють відстань до оточуючих предметів, відстань до цілі, тип здобичі, швидкість її руху. При цьому вони використовують ефект Допплера, який полягає у зміні частот і довжини хвилі випромінювання через рух джерела випромінювання хвилі. Якщо джерело хвиль рухається в середовищі і при цьому випромінює хвилі, то відстань між хвилями залежить від швидкості та напрямку руху джерела і приймача. Якщо джерело рухається в напрямку до приймача, тобто наздоганяє хвилі, то довжина хвилі зменшується і навпаки — якщо рухається в напрямку протилежному джерелу, то довжина збільшується за формулою:

$$\lambda = \frac{2\pi(c - v)}{w_0} , \quad (13)$$

де  $w_0$  — кутова частота хвилі;

$c$  — швидкість поширення хвиль у середовищі;

$v$  — швидкість джерела звуку відносно середовища (зі знаком «+», якщо джерело наближується до приймача і зі знаком «-», якщо віддаляється).

Для роботи алгоритму використовуються такі значення:

- частоти хвилі лежать у діапазоні  $[f_{\min}; f_{\max}]$ ;
- відповідають діапазону довжин хвиль  $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$ .

Опишемо рух кажанів, що необхідні алгоритму, формулами:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta ; \quad (14)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*)f_i ; \quad (15)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t , \quad (16)$$

де  $\beta \in [0,1]$  — випадкова величина;

$x_*$  — найкращий поточний розв'язок.

На кожній ітерації алгоритму відбувається оновлення амплітуди імпульсу і його емісія. Коли кажан наближається до цілі гушність його імпульсів зменшується (17), а частота імпульсів збільшується (18):

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t , \quad (17)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \left[ 1 - \frac{1}{e^{\gamma t}} \right] , \quad (18)$$

де  $\alpha$  та  $\gamma$  — константи.

Складність такого алгоритму залежить від кількості осіб у зграї, що використовується в алгоритмі, кількості екстремумів і розмірності задачі.

*Алгоритм хаотичного кажана (chaotic bat algorithm CBA)* використовує у своїй основі теорію хаосу з використанням кусково-хаотичних карт. Хаотичні системи є дуже поширеними в природних і соціальних системах, які мають складну, випадкову та точну характеристику [Sha-Sha Guo, Jie-Sheng Wang, Xiao-Xu Ma 2019, Suganthi Jeyasingh 2017]. Хаотичний рух — це дуже нестабільний рух у детермінованій системі, обмежений простором кінцевих фаз. Хаос — це форма аперіодичного руху, яка є унікальною та загальною у нелінійних системах. Аналізуючи логістичне рівняння, воно відоме як найтипніше для хаотичних систем:

$$S_{k+1} = \mu S_k (1 - S_k) , \quad (19)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт переходу, що є константою,

$S_k$  — значення коефіцієнта, формується за правилом хаотичної карти,  $S \in (0,1)$ . Послідовність  $S_0, S_1, \dots$  є детермінованою,

що сформована за певним правилом хаотичної карти. Існує 10 типових видів хаотичної картографії, але оптимальний вид хаотичної карти обирається шляхом проведення імітаційних експериментів на тестових функціях. На основі ряду наукових робіт, було проаналізовано застосування різних хаотичних карт і запропоновано обрання як найкращої — частино-хаотичної карти. При цьому запропоновано початкового значення 0.7 і забезпечує швидкість знаходження оптимального рішення.

*Алгоритм кажанів на основі стратегії пошуку польотів (Levy Flight Search Strategy (LBA))* базується на методі польотів Леві, який базується на траєкторії руху живих істот при пошуку їжі у невизначеному та непередбачуваному середовищі. Польоти Леві складаються з коротких швидких рухів і періодичних довгих повільних пересувань і відображують траєкторію польоту альбатросів, бджіл і фруктових дрозофіл. Поведінка польотів Леві є найкращою стратегією пошуку для  $N$  незалежних дослідників, коли відбувається пошук об'єкта, що має випадкове розташування у просторі, а також не можливо математично змоделювати простір. Рух кажана в даному алгоритмі відповідає негауссовському стохастичному процесу, що дозволяє розширити простір пошуку.

У поєднанні з функцією ехолокації кажана це допомагає значно та ефективно покращити роботу алгоритму кажана. Тому вдосконалений алгоритм замінює рівняння (16) рівнянням:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \text{levy} x (x_i^{t-1} - x^*) + V_i^t. \quad (20)$$

Політ Леві використовується окремим кажаном при пошуку оптимального локального положення, що забезпечує збільшення ітерацій перевірок та оптимізацію у глобальному процесі пошуку. Все це направлено на уникнення потрапляння в локальний оптимум і прискорення знаходження оптимального рішення.

Комбінований алгоритм FSS і GWO.

Автори пропонують новий модифікований алгоритм на основі комбінації алгоритмів FSS (Fish School Search — косяку риб) і GWO (GWO — Grey Wolf Optimizer — зграї сірих вовків) для вирішення задач управління.

Алгоритм FSS заснований на харчовій поведінці косяку риб. Вони пересуваються з метою пошуку їжі, що є оптимальним рішенням, в межах області пошуку. При харчуванні вага кожної риби збільшується та формалізує її індивідуальний успіх в пошуку рішення і відіграє роль пам'яті риби. При знаходженні ефективного місця харчування риби об'єднуються у косяк.

Загальна вага показує наскільки ефективний косяк риб: якщо вага збільшується — косяк успішний; якщо вага зменшується, то косяк НЕ успішний. Весь косяк рухається до розташування найуспішніших риб. В іншому випадку косяк поширюється по всій запропонованій території [C. J. A. B Filho., F. B. de Lima Neto, A. J. C. C. Lins, A. I. S. Nascimento., and M. P. Lima 2008, de Lima Neto, Fernando Buarque, and Marcelo Gomes Pereira de Lacerda. 2013]. У проекції на задачу виконання замовлень харчового підприємства фактичний рух відбувається по порядку виконання замовлень на виготовлення продукції, а найефективнішим є той, при якому за менший час виконано всі замовлення з мінімальними витратами і отримано максимальна прибуток.

Основними операторами алгоритму FSS є: оператор годування і правило плавання (пересування агентів). Оператор годування визначає як виконується приріст ваги агента на кожній ітерації. В алгоритмі FSS розрізняють три види плавання: індивідуальне, інстинктивно-колективне і колективно-вольове.

При індивідуальному плаванні відбувається випадкове переміщення агента з однаковою ймовірністю в будь-якому напрямку із заданою швидкістю або на задану відстань. У розглянутій задачі відстань переходу виступає в якості замовлення на виконання. Індивідуальне плавання включає в себе не одну ітерацію і направлене на пошук оптимального рішення.

Колективно-вольове плавання виконується після інстинктивно-колективного плавання. Даний вид плавання полягає у зміщенні всіх агентів у напрямку поточного центру ваги популяції, якщо сумарна вага косяка в результаті індивідуального і інстинктивно-колективного плавання збільшилась, і в протилежному напрямку — якщо ця вага зменшилась. В іншому випадку популяція розширюється від того ж центру, підвищуючи свої диверсифікаційні властивості.

У модифікованому алгоритмі FSS і GWO при колективно-вольовому плаванні доцільно застосувати алгоритм GWO, що копіює процес полювання зграї сірих вовків у природі [Hrybkov S., Seidykh O. 2020]. Згідно з нашим завданням зграя полює за жертвою, що відповідає оптимальному оперативному плану виконання замовлень. Кожен вовк зграї відповідає альтернативному оперативним плану на кожній ітерації. Після виконання кожної ітерації для кожного вовка розраховується значення його альтернативного оперативного плану використовуючи цільової функцію. За значенням оцінки кожного вовка в зграї їх поділяють на чотири типи: «альфа» — вовк-ватажок, оцінка якого є оптималь-

не рішення за частковими критеріями або оціночною функцією; «бета» і «дельта» — це вовки, які заганяють жертву, оцінка яких — друге і третє місце серед кращих; «омега» — всі інші вовки [Yudong Zhang, Saeed Balochian, Praveen Agarwal, Vishal Bhatnagar, Orwa Jaber Housheya 2014, Mirjalili S., Lewis. A. 2014, Madadi A., Motlagh M. 2014]. Перші три типи вовків фіксуються на наступні ітерації до тих пір, поки не будуть знайдені нові альтернативні варіанти рішення, які будуть краще поточних або буде вичерпано задану кількість ітерацій. Вовки «альфа», «бета», «дельта» впливають на формування «омега» вовків [Madadi A., Motlagh M. 2014]. Використовуючи GWO алгоритм, отримуємо варіанти планів виконання замовлень.

Зупинка роботи алгоритму відбувається при вичерпанні заданої кількості ітерацій або коли повторюється оптимальне рішення протягом заданої кількості ітерацій.

Порівняння ефективності алгоритмів.

Авторами було проведено порівняння наступних алгоритмів: класичного алгоритму кажанів (BA), алгоритму кажанів на основі стратегії пошуку польотів (LBA), алгоритму кажанів на основі коефіцієнта скорочення (SBA), модифікованого алгоритму FSS & GWO.

При порівнянні алгоритмів були використані статистичні дані українських підприємств харчової промисловості, а саме макаронних, молокопереробних підприємств і підприємств з виготовлення ковбасних і м'ясних виробів.

Ефективність алгоритмів оцінено на основі таких показників: час пошуку оптимального розкладу; ефективність знайденого плану (визначається як відхилення від оцінки фактичного плану за цільовою функцією); скорочення часу виконання замовлень (розраховується як різниця між фактичним і запропонованим планом).

Необхідно відмітити, що час пошуку оптимального плану залежить від характеристик комп'ютерної техніки. Апробація проводилась на основі статистичних даних по виконанню замовлень за попередні періоди, тому в якості фактичного плану приймався такий, що виконувався. Випадковим чином за різні періоди часу було обрано 25, 50, 75 і 100 замовлень. Дослідження проводилися з однаковими параметрами для кожного алгоритму.

За результатами порівняння розглянутих алгоритмів пропонується використання алгоритму LBA. До недоліків даного методу варто віднести велике число вільних параметрів, від значення яких часто залежить результат, з іншого боку, відсутні підстави для вибору цих значень. LBA полягає у використанні методу Леві

оптимуму, що забезпечує швидкий пошук на задачах великої розмірності. При кількості замовлень менше 25 усі алгоритми працюють майже однаково, а при збільшенні відразу відчувається необхідність застосування модифікованих алгоритмів.

Якщо спростити математичну модель шляхом виключення одного з часткових критеріїв, ефективнішим є FSS & GWO алгоритм, що при розв'язку задач управління порівняно з іншими алгоритмами виграє до 40 % часу.

Висновки за виконаним дослідженням.

Запропонована модифікована математична модель планування виконання замовлень з урахуванням основних особливостей діяльності підприємств харчової галузі, що дає змогу оцінити формування оптимальних варіантів розкладу виконання замовлень.

Запропоновано модифікований алгоритм LBA, що забезпечує формування альтернативних планів виконання замовлень, з урахуванням розробленої математичної моделі. Застосування альтернативних планів дозволяє формувати нові та проводити реконфігурації існуючих за короткий період часу. Якщо спростити математичну модель шляхом виключення одного з часткових критеріїв, ефективнішим є алгоритм FSS & GWO, що значно виграє за часом при розв'язку задач управління порівняно з іншими алгоритмами.

### ***Бібліографічні посилання***

1. de Lima Neto, Fernando Buarque, and Marcelo Gomes Pereira de Lacerda. (2013) Multimodal Fish School Search Algorithms Based on Local Information for School Splitting.» BRICS Congress on Computational Intelligence and 11th Brazilian Congress on Computational Intelligence. IEEE, 2013

2. Georgiadis G. P., Elekidis, A. P., Georgiadis, M. C. (2019) Optimization-Based Scheduling for the Process Industries: From Theory to Real-Life Industrial Applications. Processes. V. 7..

3. Hrybkov S., Kharkianen O., Lytvynov, Ovcharuk V., Ovcharuk I. (2020). Development of information technology for planning order fulfillment at a food enterprise, 1/3. (103).

4. Hrybkov S., Lytvynov V., Oliinyk H. (2018). Web-oriented decision support system for planning agreements execution. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/2. (99).

5. Hrybkov S., Seidykh O. (2020). Manufacturing management methods at the expense of using bat algorithm / Вдосконалення методів управління виробництвом за рахунок використання алгоритму кажанів / Modern engineering and innovative technologies Issue 12 / Part 3, Germany : Sergeieva&Co «+»ISE&E». DOI : 10.30890/2567-5273.2020-12-03-061

6. C. J. A. B Filho., F. B. de Lima Neto, A. J. C. C. Lins, A. I. S. Nascimento., and M. P. Lima (2008) «A novel search algorithm based on fish

school behavior.» Systems, Man and Cybernetics, SMC. IEEE International Conference on, 2008, pp. 2646-2651.

7. Madadi A., Motlagh M. (2014) Optimal Control of DC motor using Grey Wolf Optimizer Algorithm // Technical Journal of Engineering and Applied Science. Vol. 4(4).

8. Mirjalili S., Lewis. A. (2014) Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. Vol. 69.

9. Santosh K. S., Vinod, K. G. (2015) Genetic Algorithms: Basic Concepts and Real World Applications. International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems (IJEECS), 3 (12).

10. Sha-Sha Guo, Jie-Sheng Wang, Xiao-Xu Ma (2019) Improved bat algorithm based on multipopulation strategy of island model for solving global function optimization problem / Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/cin/2019/6068743/>.

11. Suganthi Jeyasingh (2017) Modified Bat Algorithm for Feature Selection with the Wisconsin Diagnosis Breast Cancer (WDBC) Dataset / Mode of access: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC555532/>.

12. Yang-Kuei Lin (2018) Scheduling efficiency on correlated parallel machine scheduling problems // Operational Research. Vol. 18, Issue 3.

13. Yudong Zhang, Saeed Balochian, Praveen Agarwal, Vishal Bhatnagar, Orwa Jaber Housheya (2014) Artificial Intelligence and Its Applications // Mathematical Problems in Engineering. Article ID 840491. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/840491>

Статтю подано до редакції 19.10.2020

УДК: 517.9

DOI 10.33111/mise.99.5

**Джалладова І. А.**, д. фіз.-мат. наук,  
професор кафедри комп'ютерної математики та інформаційної безпеки  
**Бабинюк О. І.**, к. е. н.,  
доцент кафедри комп'ютерної математики та інформаційної безпеки  
**Лютій О. І.**, к.т.н.,  
доцент кафедри комп'ютерної математики та інформаційної безпеки,  
ДВНЗ «КНЕУ імені Вадима Гетьмана»

**Dzhalladova I. A.**, Doctor of Science in Physics and Mathematics,  
Professor Head of the Department of Computer Mathematics and Information Security

**Babynuk O. I.**, Candidate of Economic Sciences,  
Associate Professor of the Department of Computer Mathematics and Information Security

**Liutyj O. I.**, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Computer Mathematics and Information Security Department, SHEI KNEU named after V. Hetman