

УДК 004.9:004.02:65.012.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195455

## Розробка інформаційної технології планування виконання замовлень для харчового підприємства

С. В. Грибков, Е. В. Харкянен, В. О. Овчарук, І. В. Овчарук

Запропоновано інформаційну технологію для розв'язання задачі планування виконання замовлень по виготовленню продукції на харчових підприємствах в умовах невизначеності та ризику. Інформаційна технологія ґрунтується на комбінуванні алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків та генетичного, а також розробленій математичної моделі оперативного виконання замовлень. Перевагами комбінування алгоритмів є формування альтернативних варіантів планів та уникнення локальних оптимумів. Запропонована математична модель містить часткові критерії, обмеження та оціночну функцію для визначення ефективності сформованого варіанту плану виконання замовлень. Для наочності оцінки ефективності варіанту виконання замовлень запропоновано застосування пелюсткової діаграми та адитивної згортки часткових критеріїв. Математична модель дозволяє ОПР визначити будь-який набір часткових критеріїв для врахування особливостей параметрів виконання замовлень.

Інформаційна технологія забезпечує швидку реконфігурацію поточного плану виконання замовлень у разі виникнення позаштатних ситуацій або необхідності термінового виконання певного замовлення

Ключові слова: математична модель, планування виконання замовлень, комбінований алгоритм

### 1. Вступ

Харчова промисловість є однією зі стратегічних галузей в багатьох країнах. Її підприємства виготовляють життєво необхідні для населення товари забезпечуючи продовольчу безпеку. Підприємства харчової промисловості повинні жорстко дотримуватися санітарно-гігієнічних вимог до кінцевого продукту та процесу виготовлення згідно нормативно-правових державних та міжнародних стандартів. На функціонування харчових підприємств впливає сезонність попиту та постійні коливання цін на сировину та енергоресурси. Жорстка конкуренція з внутрішніми та зовнішніми виробниками вимагає від керівників швидкого реагування на вимоги споживачів.

При цьому попит на готову продукцію змінюється в залежності від соціально-економічних обставин в країні. Споживачі постійно висувають вимоги щодо нового асортименту, якості, вартості, та фізико-органолептичних показників продукції. Задоволення цих потреб вимагає від підприємства харчової промисловості постійного удосконалення та розширення асортименту продукції, створення альтернативних рецептур, що включають нові або покращені компоненти, а також удосконалення власних технологічних процесів.

Переважає більшість харчових підприємств випускає широкий асортимент продукції, що призводить до додаткових вимог та обмежень при виробництві продукції. Зміна виробничого плану може призводити до змін у обсягах використання сировини і матеріалів, потребі у людських ресурсах, зміни або переналаштування виробничого обладнання, зміни у графіках відвантаження готової продукції. В цих умовах структура управління підприємством повинна забезпечувати гнучке та швидко реагуюче виробництво.

Управління складними організаційно-технологічними комплексами, а саме до таких відносяться підприємства харчової галузі, вимагає постійного удосконалення форм управління. В сучасних конкурентних умовах досягнення високих економіко-соціальних показників можливе тільки при використанні інформаційних технологій, які будуть забезпечувати моніторинг і аналіз зовнішніх та внутрішніх показників діяльності підприємства. Їх розробка і впровадження забезпечать гнучке динамічне управління з максимальним урахуванням зовнішніх та внутрішніх впливів і обмежень при прийнятті оперативних та стратегічних рішень.

Сьогодні при вирішенні задачі складання оперативно-календарних планів та при вирішенні виробничих задач використовують так званий метод декомпозиції цілей. Згідно з ним, відбувається локальне розв'язання задач без урахування усіх факторів, що можуть в 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 та сховищ даних.

Існуючі інформаційні системи, як правило, мають високу вартість та потребують адаптації/інтеграції до конкретного виробництва. Впровадження нової інформаційної системи часто потребує реінжинірингу бізнес-процесів управління, при цьому розв'язання задач може здійснюється без врахування усіх впливів. Процес інтеграції та впровадження інформаційної системи вимагає додаткових витрат, а її використання високої кваліфікації керівників різних рівнів управління в області ІТ-технологій. Тому застосування таких систем не завжди може забезпечити точності та об'єктивність прийнятих рішень особливо в умовах невизначеності та ризиків.

Планування виконання замовлень на основі використання класичних, евристичних та еволюційних методів розглядалося різними науковцями, але задача досі залишається актуальною. Її пов'язують з виникненням Індустрії 4.0, що є четвертою промисловою революцією. Основна мета Індустрії 4.0 полягає повній автоматизації виробництва, а управління усіма процесами виробництва здійснюється в режимі реального часу з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Головною рисою Індустрії 4.0 є те, що підприємства повинні виготовляти продукцію відповідно до вимог індивідуального замовника, оптимізуючи собівартість виробництва. Здійснення управління усіма ланками підприємства повинно бути узгодженим, що не можливо досягти використовуючи стандартні методи управління. Їх застосування призводить до витрат часових ресурсів, що не відповідає потребі управління 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 його напрямку. Особливо важливим є напрям розробки інформаційних технологій на основі модифікованих алгоритмів та методів.

## **2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми**

У роботі [1] авторами запропоновано математичну модель задачі планування виконання договорів та визначено часткові критерії оцінки ефективності отриманого варіанту рішення, а також запропоновано адитивну згортку визначених критеріїв зі встановленням пріоритету виконання кожного з них. Для знаходження альтернатив плану виконання замовлень запропоновано використання модифікованого АСО (Ant Colony Optimization) алгоритму. Для його застосування вхідні дані формуються у вигляді багатошарового графа, кожний шар якого відповідає робочому часу одного виконавця, а вузли визначають моменти синхронізації між шарами. Використання запропонованих алгоритмів неможливе без застосування інформаційних систем, тому у роботі [1] запропоновано структуру web-орієнтованої СППР при плануванні виконання договорів, а також розглянуто технології для її практичної реалізації. Але недоліком запропонованих підходів 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.

В роботі [2] автори запропонували інформаційну технологію коригування структури асортименту продукції засобами інтелектуального аналізу даних. Розроблена технологія призначена для забезпечення харчового підприємства інформаційною підтримкою при прийнятті управлінських рішень щодо пошуку резервів зниження сукупної собівартості продукції та отримання додаткового прибутку. Запропонована технологія може бути використана як на багатомементному харчовому підприємстві, так і в інших галузях виробництва. Проте, не передбачає складання розкладу виконання замовлень, а направлена лише на виробітку пропозицій щодо коригування структури асортименту продукції.

Вирішення задач оптимізації управління та планування промислових процесів розглядається авторами роботи [3] на основі використання генетичних алгоритмів, але не розглянуто особливості окремих галузей виробництва.

Авторами роботи [4] описана апробація запропонованого ними гібридного алгоритму планування на основі алгоритму рою часток та АСО алгоритму. В роботі також проводиться порівняння розробленого алгоритму із різними модифікаціями генетичного алгоритму. Запропонований алгоритм не враховує економіко-соціальні впливи при знаходженні оптимального плану.

У дослідженні [5] розглянуто процес планування завдань на паралельному обладнанні. Наведена математична модель враховує лише деякі критерії ефек-

тивності при плануванні виконання операцій на різних технологічних машинах. В роботі враховується можливість зміни кількості періодів, числа виконавців, паралельність виконання операцій на різних машинах. Але розглянутий методу гілок та границь має складності при вирішенні задач для обладнання, яке використовується паралельно.

Публікація [6] присвячена опису алгоритму планування на основі базового алгоритму посиленого використанням алгоритму штучної бджолоїної колонії з методом локального пошуку. Додатковий оператор сусідства використовується в роботі на основі жадібно-конструктивно-деструктивно-процедури. Наведений алгоритм не дозволяє враховувати пріоритети часткових критеріїв та обмежень.

У роботі [7] запропоновано удосконалення генетичного алгоритму за рахунок використання механізму вибіркової ініціалізації. Використання розглянутого модифікованого методу можливо тільки у складі іншого методу чи технології

В роботі [8] розглянута математична модель виробничого планування на малому підприємстві, яка дозволяє автоматизувати побудову оптимальних виробничих розкладів, а також дослідити динаміку руху виробництва на всіх стадіях виготовлення продукції. Розроблена модель призначена для використання на малих підприємствах і не враховує можливість виникнення таких факторів як накладання штрафних санкцій, необхідність встановлення черговості замовлень, необхідність заміни сировини.

Автори роботи [9] запропонували та обґрунтували структуру нечіткої ситуаційної мережі для системи підтримки прийняття рішень. Запропонований підхід доцільно застосовувати у випадках слабкоструктурованих або неструктурованих проблем і відсутністю точних моделей для опису проблемних ситуацій. Розглянутий в роботі [9] підхід забезпечить підвищення ефективності керування організаційно-технічними (технологічними) системами, які працюють на значних часових інтервалах.

Запропонована в роботі [10] інформаційна технологія призначена для вирішення задачі підтримки прийняття рішень щодо перепрофілювання виробництва на віртуальних приладобудівних підприємствах, відповідно до кон'юнктури ринку. Виробнича програма формується виходячи з існуючого на даний момент попиту на різні категорії виробів, що входять у номенклатуру товарів підприємства або відповідають напрямку функціонування виробництва на віртуальних приладобудівних підприємствах. Авторами розроблено модель процесів інформаційно-аналітичного порталу, що дозволяє клієнту сформулювати свої замовлення, які потім передаються у виробництво, а також математичну модель обґрунтування розподілу ресурсів для виготовлення продукції підприємства. Отримані результати обчислень дозволяють вирішити задачу перепрофілювання виробництва. Не розкритим у дослідженні залишились питання щодо прийняття рішень по визначенню доцільності виготовлення того чи іншого виду продукції та граничнодопустимих обсягів виробництва і розподілу ресурсів виробництва.

В роботі [11] представлено огляд теоретичних концепцій планування різних виробничих процесів. Проведено критичний аналіз загальних чинників, які заважають використанню планування на основі методів оптимізації, а також

запропоновані підходи щодо їх усунення. Робота [11] має більш узагальнений характер та не стосується підприємств харчової галузі.

Проведений аналіз розглянутих вище літературних джерел [1–11] дає підстави стверджувати про доцільність створення інформаційної технології з використанням модифікованих мультиагентних та генетичних алгоритмів для розв'язання задачі планування виконання замовлень по виготовленню продукції на харчових підприємствах.

Інформаційна технологія забезпечить формування варіантів виконання замовлень, їх оцінку, пошук оптимальних варіантів, можливість уточнення та корегування вхідних та проміжних даних для отримання різних варіантів плану з їх подальшою оцінкою.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою роботи є розробка інформаційної технології для підтримки процесу планування виконання замовлень на харчових підприємствах, для виконання їх точно в заданий час для мінімізації витрат.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- розробити математичну модель планування виконання замовлень, що враховує особливості технологічного процесу виготовлення харчової продукції;
- створити концепцію інформаційної технології для плану виконання замовлень.

### **4. Розробка математичної моделі планування виконання замовлень**

Кожен рівень управління підприємством потребує врахування складного ієрархічного впливу по вертикалях рівнів управління. Основною задачею управління, що потребує врахування завдання та обмежень усіх рівнів, є оперативне корегування плану виготовлення продукції для виконання замовлень. Як правило, вирішення такої задачі зводилось до її декомпозиції до потрібного рівня. При цьому враховувались лише необхідні критерії та функції з обмеженнями, але втрачався зв'язок усіх критеріїв впливу.

Суть задачі складання плану виконання замовлень полягає у формуванні такого розкладу, в якому змінні завдання закріплюються за технологічними лініями/відділами, що відповідають порядку виконання етапів виготовлення продукції. Сформований план повинен забезпечити: мінімізацію сумарних виробничих витрат; оптимізацію часу виконання замовлень; мінімізацію витрат на зберігання сировини та готової продукції.

Оперативна реконфігурація плану виготовлення продукції виникає у наступних випадках:

- необхідність включення у поточний план виготовлення замовлення, яке тільки надійшло та має високий пріоритет виконання;
- виникнення позаштатних ситуацій, пов'язаних з порушенням графіку надходження сировини та матеріалів, експлуатації та стану технологічного обладнання, з порушенням умов договорів постачальниками;
- соціально-економічних потреб, пов'язаних з сезонними та політичними вподобаннями споживачів;

– змін у стратегічному напрямі діяльності підприємства.

План виробництва продукції є оптимальним, якщо його виконання забезпечує отримання максимального прибутку за заданий проміжок часу. Оптимальний план виробництва не порушує загальний стратегічний план діяльності підприємства, мінімізує змінні витрати, дозволяє максимально використати виробничо-технологічне обладнання.

Дана задача відноситься до класу ієрархічних багатокритеріальних оптимізаційних задач, включає різні часткові критерії, які в сукупності впливають на вибір оптимального рішення і використання яких визначається конкретними умовами.

Для підприємств харчової галузі автори виділяють наступні часткові критерії:

- максимізація прибутку від виконання усіх замовлень;
- мінімізація часу на виготовлення продукції;
- максимізація запасу часу при виконанні замовлень;
- мінімізація сумарних штрафів за невчасне виконання замовлення;
- мінімізація сумарного часу простою усіх одиниць технологічного обладнання та відділів;
- мінімізація сумарних витрат при виробництві;
- мінімізація сумарних витрат від простою при невикористанні обладнання, коли деякі технологічні контури незважаючи на невикористання потребують електро- та тепло- споживання;
- мінімізація сумарних витрат на переробку та утилізацію отриманої некондиційної продукції при виконанні усіх замовлень;
- мінімізація сумарних витрат на зберігання готової продукції;
- мінімізація сумарних витрат на зберігання сировини та матеріалів.

Отримання максимального прибутку від виконання замовлень на виготовлення продукції за заданий часовий проміжок є першим частковим критерієм оцінки ефективності варіанту плану (1) на плановий період  $(t + \Delta t)$ .

$$F_1(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \left( \theta_i \cdot \left( \begin{array}{c} (sd_i(t + \Delta t) - \\ - (vc_i(t + \Delta t) + \\ + vz_i(t + \Delta t))) \end{array} \right) \cdot op_i(t + \Delta t) \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

$i$  – замовлення, що знаходиться на черзі, регламентує один вид продукції, яку необхідно випустити у період  $(t + \Delta t)$ , а також регламентує вид упаковки та фасування;

$n$  – 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  $i$ -го замовлення за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $vc_i(t + \Delta t)$  – постійні витрати на виготовлення одиниці продукції для  $i$ -го замовлення за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $vz_i(t + \Delta t)$  – зміні витрати на виготовлення одиниці продукції для  $i$ -го замовлення за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $op_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовленням у період  $(t + \Delta t)$ .

Мінімізація часу на виготовлення продукції кожного  $i$ -го замовлення за період  $(t + \Delta t)$  є частковим критерієм та впливає на загальну ефективність варіанта плану (2), а обмеження (3) регламентує виготовлення продукції за період  $(t + \Delta t)$ , обмеження (4) обумовлює закінчення виготовлення продукції не пізніше визначеного терміну.

$$F_{2i}(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} \left( o_{ijl} \cdot \left( \begin{array}{l} pt_{ijl} + t_{ijl} + \\ + \eta t_{ijl} + to_{ij-1} \end{array} \right) \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

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

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

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;  
 $t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;  
 $\Delta t$  – час, за який необхідно виконати усі замовлення в хвилинах;  
 $i$  – замовлення, що знаходиться на черзі виконання, регламентує один вид продукції, яку необхідно випустити за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $j$  – номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -го замовлення;  
 $\omega_i$  – кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;  
 $l$  – номер обладнання з множини обладнання ( $l \in \sigma_i$ ) для  $i$ -го замовлення;  
 $\sigma_i$  – кількість задіяного обладнання для виконання усіх етапів при виготовленні  $i$ -го замовлення;  
 $t_i$  – час початку виконання виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  
 $dt_i$  – час, на який необхідно виготовити продукцію за  $i$ -м замовленням;  
 $\Delta t_{ijl}$  – час виконання здійснення  $j$ -о етапу на  $l$ -у обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  
 $pt_{ijl}$  – час, необхідний для підготовки  $l$ -го обладнання для здійснення  $j$ -го етапу при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням, може приймати нуль, якщо підготовка не потрібна;  
 $to_{ij-1}$  – час переходу/очікування між виконанням  $j$ -го етапу до  $(j-1)$  етапу;

$\eta_{ijl}$  – час для очищення обладнання після  $j$ -го 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  $l$ -му обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  $o_{ijl} = 0$  - в іншому випадку).

Максимізація запасу часу при виконанні кожного  $i$ -го замовлення за період  $(t + \Delta t)$  є частковим критерієм для певного замовлення та впливає на загальну ефективність варіанта плану (5).

$$F_{3i}(t + \Delta t) = \begin{cases} dt_i - t_i + \\ + F_{2i}(t + \Delta t), & \text{якщо } \begin{pmatrix} t_i + F_{2i} \times \\ \times(t + \Delta t) \end{pmatrix} < dt_i \rightarrow \max, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (5)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

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

$j$  – номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -го замовлення,

$\omega_i$  – кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;

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

$dt_i$  – час, на який необхідно виготовити продукцію за  $i$ -м замовленням.

Четвертим критерієм є сумарний розмір штрафів за невчасне виконання замовлення у плановому періоді, який визначається за формулою (6).

$$F_4(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n (g_i * \Psi_i * hk_i) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

$i$  – замовлення, що знаходиться на черзі виконання, регламентує один вид продукції, яку необхідно випустити за 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 розраховується за формулою (7) та визначає необхідність відшкодувати замовнику, якщо буде порушено термін виконання  $dt_i$ ,



$$\Psi_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (t_i + F_{2i}(t + \Delta t)) < dt_i, \\ 0, & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad (7)$$

де  $t_i$  – час початку виконання виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  $hk_i$  – коефіцієнт, який враховує необхідність сплати штрафу за запізнення за кожну добу і розраховується за формулою (8).

$$hk_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо розмір штрафу фіксований} \\ & \text{і незалежить від кількості діб,} \\ \left\lceil \frac{F_{2i}(t + \Delta t)}{24} \right\rceil, & \text{в іншому випадку} \\ \text{визначаємо кількість діб.} \end{cases} \quad (8)$$

П'ятим критерієм є мінімізація сумарного часу не використання (простою) усіх одиниць технологічного обладнання та відділів в цілому, який визначається за формулою (9).

$$F_5(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} \left( o_{ijl} \cdot \begin{pmatrix} t z l_{i(j-1),l} - \\ - t p l_{ij,l} \end{pmatrix} \right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

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

$j$  – номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -го замовлення,

$\omega_i$  – кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;

$l$  – номер обладнання з множини обладнання ( $l \in \sigma_i$ ) для  $i$ -го замовлення;

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

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

$t z l_{i(j-1),l}$  – час завершення виконання  $(j-1)_l$ -го етапу на  $l$ -му обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням;

$t p l_{ij,l}$  – час початку виконання  $j$ -го етапу на  $l$ -му обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням;

$o_{ijl}$  – параметр, що приймає значення  $\{0,1\}$  ( $o_{ijl} = 1$ , якщо  $j$ -й етап виконується на  $l$ -му обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням;  $o_{ijl} = 0$  в іншому випадку).

Шостим критерієм є значення сумарних витрат, які неминучі при виконанні  $j$ -го етапу на  $l$ -му обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням за одиницю час, адже якщо технологічна ділянка виступає як окремий цех тоді враховуються увесь час експлуатації, що розраховується за формулою (10).

$$F_6(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} \left( o_{ijl} \cdot \left( pt_{ijl} + \Delta t_{ijl} + \eta t_{ijl} \right) \right) \cdot c_{ijl} \right) \rightarrow \min, \quad (10)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

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

$j$  – номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -го замовлення,

$\omega_i$  – кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;

$l$  – номер обладнання з множини обладнання ( $l \in \sigma_i$ ) для  $i$ -го замовлення,

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

$\Delta t_{ijl}$  – час виконання здійснення  $j$ -го етапу на  $l$ -му обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;

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

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

$\eta t_{ijl}$  – час для очищення обладнання після  $j$ -го етапу виготовлення продукції за  $i$ -м замовлення на  $l$ -му обладнанні, якщо воно не потрібно або це необхідно перед проведенням ремонтно-профілактичних робіт;

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

Сьомим критерієм є мінімізація витрат на обладнання, що простоює, але це тоді коли в обладнанні є контури, що потребують постійного включення, який визначається за формулою (11).

$$F_7(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} \left( \begin{array}{l} NOT(o_{ijl}) \times \\ \times \begin{pmatrix} tzl_{i(j-1),l} \\ - \\ -tpl_{ij,l} \end{pmatrix} \cdot cp_l \cdot vk_l \end{array} \right) \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

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

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

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

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

$tzl_{i(j-1),l}$  – час завершення виконання  $(j-1)$ -о етапу на  $l$ -у обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням;

$tpl_{i(j-1),l}$  – час початку виконання  $j$ -го етапу на  $l$ -у обладнанні при виготовленні продукції за  $i$ -м замовленням;

$vk_l$  – параметр, що приймає значення  $\{0,1\}$  ( $vk_l = 1$ , якщо  $l$ -у обладнання при простій має постійно включені елементи;  $vk_l = 0$  в іншому випадку).

$cp_l$  – витрати при простій  $l$ -у обладнанні;

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

Восьмим критерієм є мінімізація витрати на переробку та утилізацію отриманої некондиційної продукції при виконанні усіх замовлень, який визначається за формулою (12).

$$F_8(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\omega_i} \sum_{l=1}^{\sigma_i} \left( \begin{array}{l} o_{ijl} \cdot cn_{ijl} \cdot vnk_{ijl} \times \\ \times op_i(t + \Delta t) \end{array} \right) \rightarrow \min, \quad (12)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;

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

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

$j$  – номер етапу з множини етапів ( $j \in \omega_i$ ) для  $i$ -о замовлення,  $\omega_i$  – кількість необхідних етапів виготовлення  $i$ -го замовлення;  
 $l$  – номер обладнання з множини обладнання ( $l \in \sigma_i$ ) для  $i$ -о замовлення,  $\sigma_i$  – кількість задіяного обладнання для виконання усіх етапів при виготовленні  $i$ -го замовлення;  
 $n$  – загальна кількість замовлень, які необхідно виконати за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $cn_{ijl}$  – вартість перероблення чи утилізації одиниці отриманої некондиційної продукції при виконанні  $i$ -о замовлення на  $l$ -у технологічному обладнанні;  
 $op_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $vnk_{ijl}$  – загальна кількість некондиційної продукції, отриманої на кожну одиницю продукції під час виконання  $j$ -о етапу  $i$ -о замовлення на  $l$ -у технологічному обладнанні;  
 $o_{ijl}$  – параметр, що приймає значення  $\{0,1\}$  ( $o_{ijl} = 1$ , якщо  $j$ -е етап можливо виконати на  $l$ -у обладнанні для виготовлення продукції за  $i$ -м замовлення;  $o_{ijl} = 0$  в іншому випадку).

Дев'ятим критерієм є мінімізація витрати на зберігання готової продукції, який визначається за формулою (13).

$$F_9(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \left( vz_i \cdot op_i(t + \Delta t) \times \max \left( 0, dt_i - \left( \frac{t_i + F_{2i} \times}{\times(t + \Delta t)} \right) \right) \right) \rightarrow \min, \quad (13)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;  
 $t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;  
 $\Delta t$  – час, за який необхідно виконати усі замовлення в хвилинах;  
 $i$  – замовлення, що знаходиться на черзі виконання, регламентує один вид продукції, яку необхідно випустити за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $op_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $vz_i$  – вартість зберігання продукції за  $i$ -м замовлення;  
 $dt_i$  – час, на який необхідно виготовити продукцію за  $i$ -м замовленням.

Десятим критерієм є мінімізація витрати на зберігання сировини та матеріалів, що необхідні для виготовлення продукції, який визначається за формулою (14).

$$F_{10}(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r_i} \left( vsr_{ik} \cdot rk_{ik} \cdot op_i(t + \Delta t) \times \max(0, t_i - rt_{ik}) \right) \rightarrow \min, \quad (14)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;  
 $t$  – час початку виконання плану, який позначається датою та часом до хвилини;  
 $\Delta t$  – час, за який необхідно виконати усі замовлення в хвилинах;  
 $i$  – замовлення, що знаходиться на черзі виконання, регламентує один вид продукції, яку необхідно випустити за період  $(t + \Delta t)$ ;  
 $k$  – вид ресурсу необхідного для виконання  $i$ -м замовлення, а загальна кількість видів ресурсів необхідних для виконання  $i$ -м замовлення  $r_i$ ;  
 $r_i$  – перелік ресурсів необхідного для виготовлення продукції за  $i$ -м замовленням;  
 $vsr_{ik}$  – вартість зберігання  $k$ -о компонента для виконання  $i$ -м замовлення;  
 $rk_{ik}$  – обсяг сировини необхідний для виготовлення одиниці продукції за  $i$ -м замовленням;  
 $op_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ .  
 $t_i$  – час початку виготовлення продукції за  $i$ -м замовлення;  
 $rt_{ik}$  – час надходження  $k$ -о компонента для виконання  $i$ -м замовлення.

Для описаної математичної моделі висувуються наступні додаткові умови та обмеження, що враховують усі особливості задачі:

1. Кожне  $l$ -е технологічне обладнання або виробничий підрозділ може виконувати не більше одного  $j$ -го етапу  $i$ -го замовлення, що описується умовою в формулі (15).

$$\sum_{j=1}^{\sigma_i} o_{ijl} = 1. \quad (15)$$

2. Для того, щоб отримати готову продукцію в повному обсязі та асортимент згідно планових замовлень, усі етапи повинні бути виконані з використанням потрібного технологічного обладнання за виразом (16).

$$\sum_{j=1} \sum_{l=1} o_{ijl} = \omega_i. \quad (16)$$

3. Для кожного  $i$ -го замовлення необхідно враховувати те, що кожен етап технологічного процесу може розпочатися лише після завершення усіх попередніх етапів. Якщо  $o_{i(j-1)(l-1)} = 1$  та  $o_{ijl} = 1$ , тоді час початку виконання  $l$ -го етапу визначається виразом (17).

$$\tau_{i(j-1)(l-1)} + \Delta\tau_{i(j-1)(l-1)} \leq \tau_{ijl}, \quad (17)$$

де  $\tau_{i(j-1)(l-1)}$  – час початку виконання  $(j-1)$  попереднього етапу  $i$ -го замовлення на  $(l-1)$  попередньому технологічному обладнанні;

$\Delta\tau_{i(j-1)(l-1)}$  – сумарний час експлуатації ( $l-1$ ) попереднього технологічного обладнання для виконання ( $j-1$ ) попереднього етапу  $i$ -го замовлення;

$\tau_{ijl}$  – час початку виконання  $j$ -го поточного етапу  $i$ -го замовлення на  $l$ -му технологічному обладнанні.

4. Обмеження (3) регламентує виготовлення продукції за період  $(t + \Delta t)$  і не може виходити за ці межі.

5. Обмеження (4) обумовлює закінчення виготовлення продукції не пізніше визначеного терміну встановленого замовником.

6. Час початку виконання  $i$ -го замовлення на  $l$ -му технологічному обладнанні може бути заданий константою чи проміжком, що визначається показниками роботи конкретної бригади при фасуванні/пакуванні або при початку виготовлення специфічного виду продукції та описується виразом (18).

$$o_{ijl} = \text{const} \text{ або } o_{ijl} \in [a, b], \quad a, b - \text{const.} \quad (18)$$

Наприклад, виготовлення  $i$ -го замовлення повинно припадати тільки на другу зміну, тобто :  $o_{ijl} \in [16:15..23:55]$ .

7. У випадку, якщо на плановий період  $(t + \Delta t)$  передбачається виконання ремонтно-профілактичних робіт на певному обладнанні, тоді плановий період розбивається на два проміжки до та після виконання таких робіт.

8. Усі види ресурсів для виконання  $i$ -го замовлення повинні бути у повному обсязі (18), а їх надходження повинні бути не пізніше початку етапу для виконання  $i$ -го замовлення визначається виразом (19).

$$\sum_{k=1}^{r_i} rk_{ik} \cdot op_i(t + \Delta t) \geq rkz_k, \quad (19)$$

$$trp_{ik} \leq \tau_{ijl},$$

де  $\tau_{ijl}$  – час початку виконання  $j$ -го етапу  $i$ -го замовлення на  $l$ -му технологічному обладнанні;

$k$  – вид ресурсу необхідного для виконання  $i$ -го замовлення;

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

$op_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ .

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

$rkz_k$  – обсяг сировини  $k$ -го виду ресурсу, що надійшов в момент часу  $trp_{ik}$ ;

$trp_{ik}$  – час надходження  $k$ -го виду ресурсу до початку виконання  $j$ -го поточного етапу  $i$ -го замовлення на  $l$ -му технологічному обладнанні.

9. Бувають випадки, коли необхідно зберегти повну, або часткову пріоритетність виконання замовлення, тому можуть вводиться часткове, або повне ранжування замовлень, а також чітка послідовність у вигляді нерівностей, наприклад  $u < p$ , де  $u$  та  $p$  номери замовлень.

10. Обсяг виготовлення продукції не може перевищувати максимальну можливу потужність підприємства в цілому і задається формулою (20).

$$\text{MinOp}_i \leq \text{op}_i(t + \Delta t) \leq \text{MaxOp}_i, \quad (20)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;  
 $\text{op}_i(t + \Delta t)$  – обсяг готової продукції, яку необхідно виготовити за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;

$\text{MinOp}_i$  – мінімально можливий обсяг виготовлення продукції, за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ , що будуть рентабельні;

$\text{MaxOp}_i$  – максимально можливий обсяг виготовлення продукції, за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ .

11. Термін зберігання готової продукції не може перевищувати термін придатності до вживання та термін переробки і задається формулою (21).

$$\begin{aligned} \text{tvug}_i(t + \Delta t) \leq \text{tvug}_i(t + \Delta t) + \text{tper}_i(t + \Delta t) \leq \text{tvug}_i(t + \Delta t) + \text{tvidg}_i(t + \Delta t), \\ \text{tvug}_i(t + \Delta t) + \text{tprid}_i(t + \Delta t), \end{aligned} \quad (21)$$

де  $(t + \Delta t)$  – плановий період на який розраховується виробничий план;

$\text{tvug}_i(t + \Delta t)$  – час виготовлення продукції, яку виготовили за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;

$\text{tper}_i(t + \Delta t)$  – час, за який можливо здійснити переробку продукції, яку виготовили за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;

$\text{tvidg}_i(t + \Delta t)$  – час, через який можливо здійснити відвантаження готової продукції, яку виготовили за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ ;

$\text{tprid}_i(t + \Delta t)$  – час придатності готової продукції, яку виготовили за  $i$ -м замовлення у період  $(t + \Delta t)$ .

12. Термін зберігання сировини не може перевищувати термін можливого використання і задається формулою (22).

$$\text{tr}_k \leq \text{tr}_k + \text{tvug}_k, \quad (22)$$

де  $\text{tr}_k$  – час коли надійшла сировина;  $\text{tvug}_k$  – час який може зберігатися сировина, яка надійшла у час  $\text{tr}_k$ .

13. Зберігання виготовленої продукції обмежено можливим обсягом зберігання (23).

$$pg_i(t) \leq Maxpg_i(t), \quad (23)$$

де  $pg_i(t)$  – обсяг  $i$ -го виду продукції, який виготовлено але не відвантажено на момент часу  $t$ ;

$Maxpg_i(t)$  – максимальний обсяг  $i$ -го виду продукції, який може зберігатися в момент часу  $t$ .

14. Зберігання сировини обмежено можливим обсягом зберігання (24).

$$pr_k(t) \leq Maxr_k(t), \quad (24)$$

де  $pr_k(t)$  – обсяг  $k$ -о виду сировини, який присутній на моменти часу  $t$ ;  
 $Maxr_k(t)$  – максимальний обсяг  $k$ -го виду сировини, який може зберігатися в момент часу  $t$ .

Вчасне забезпечення ресурсами кожного етапу виробничого процесу сприятиме його неперервності та зменшить час простоїв обладнання.

В залежності від соціальної та економічної ситуації, а також особливостей менеджера, який відповідає за складання оперативно-календарного плану виконання замовлення задача може вирішуватися за різними варіантами, а саме:

- в оцінці ефективності оперативно-календарного плану виконання замовлення приймаються усі критерії, а також вони ранжуються;
- задача спрощується до вибору певних часткових критеріїв.

Для критеріїв, які оцінюються в грошових одиницях застосовується адитивна згортка з встановленням пріоритетів для кожного з них у відповідності до конкретного випадку. Адитивна згортка представлена формулою (25) та направлена на мінімізацію витрат [1].

$$F' = \sum_{\gamma=1}^{\Omega} \xi_{\gamma} \cdot \lambda_{\gamma} \rightarrow \min, \quad (25)$$

де  $\xi_{\gamma}$  – коефіцієнт пріоритету часткового критерію, але за умови використання тільки часткових критеріїв для вартісної оптимізації,  $0 \leq \xi_{\gamma} \leq 1$ ,  $\sum_{\gamma=1}^{\Omega} \xi_{\gamma} = 1$ ;

$\gamma$  – номер критерію ( $1 \leq \gamma \leq \Omega$ );

$\Omega$  – загальна кількість часткових критеріїв, що будуть враховані менеджером;

$\lambda_{\gamma}$  – нормалізований  $\gamma$ -й частковий критерій; нормалізація виконується з метою приведення різних критеріїв до єдиної розмірності та розраховується за формулою (26):



$$\lambda_{\gamma} = \frac{F_{\gamma} - F_{\gamma}^{\min}}{F_{\gamma}^{\max} - F_{\gamma}^{\min}}. \quad (26)$$

Частіше виникає ситуація, коли необхідно врахувати усі критерії, і тоді необхідно вірно оцінити варіанти планів. Для наочного представлення інформації авторами пропонується використання пелюсткової діаграми (рис. 1).

На діаграмі наведено п'ять варіантів оперативних планів. Кожна вісь відповідає певному частковому критерію, плани відображені різними кольорами. Для оцінки різниці у кожному варіанті плану використана площа, зайнята діаграмою.

Вибір такого виду діаграми обумовлений тим, що при оцінці сукупності критеріїв, які мають різні види та градацію шкал, на діаграмі зручно наочно представити та оцінити кожен варіант

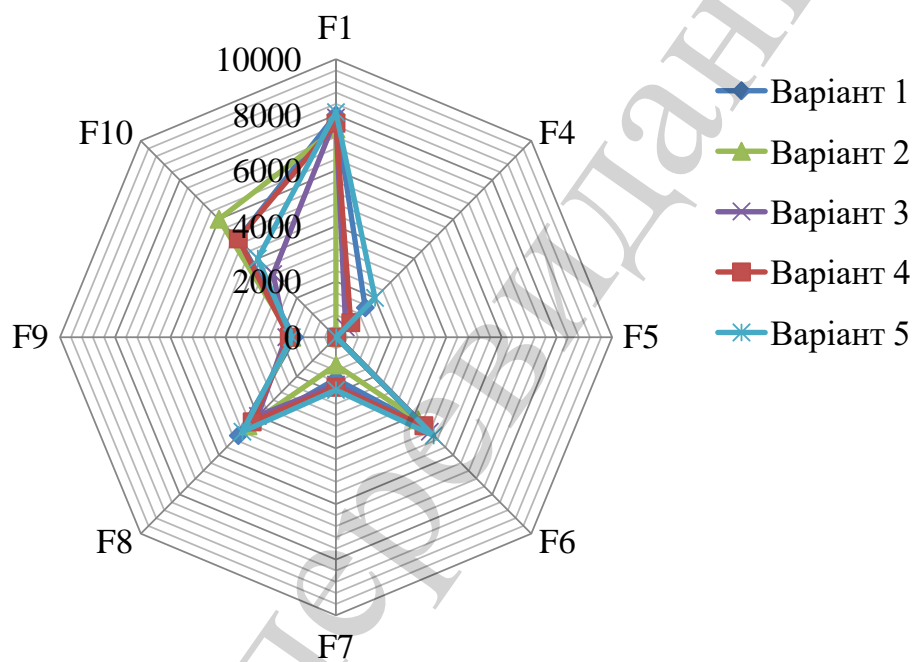


Рис. 1. Приклад порівняння п'яти варіантів планів

Розроблена математична модель дає змогу оцінити та побудувати оперативно-календарний план виконання замовлень, а дана задача належить до класу багатокритеріальних NP-складних комбінаторних задач. Складність розв'язання такої задачі зростає з кількістю замовлень, а також зі збільшенням етапів різних варіантів виконання на різних технологічних ланках виробництва. Задача може бути спрощена тільки на підприємствах, де технологічний процес виготовлення продукції відбувається на одному автоматизованому технологічному комплексі, що має конвеєрний безперервний цикл виробництва. Прикладом може бути макаронне виробництво, де виготовлення певного виду продукції здійснюється на одній автоматизованій технологічній лінії.

## 5. Створення концепції інформаційної технології плану виконання замовлень

За довгі роки розвитку та впровадження інформаційних систем в різних галузях та напрямках діяльності більшістю харчових підприємств було здійснено накопичення великих обсягів даних, що відображають наслідки прийняття рішень в різних штатних та позаштатних ситуаціях. Навіть накопичена інформація за один рік про діяльність підприємства може надати стратегічні підказки для розв'язання більшості задач управління у виробничих умовах.

Для розв'язання задачі оперативного планування виконання замовлень на харчовому підприємстві запропонована інформаційна технологія. Вона поєднує в собі підготовку та обробку інформації, елементи віртуального сховища даних, елементи інтелектуального аналізу даних, використання метаевристичних алгоритмів та їх модифікації. Схема реалізації інформаційної технології наведена на рис. 2.

Використання інформаційної технології базується на накопичених даних в базах даних (БД) підприємства та інших інформаційних джерелах (ІД). Інформації з БД та ІД завантажуються у віртуальне сховище даних (СД), яке вміщує тільки актуальну інформацію за визначений ОПР (особа яка приймає рішення) період часу. Обрання саме віртуальної моделі СД обумовлено тим, що кожен раз будуть завантажуватись данні за необхідний період, а також не буде потреби зберігати надлишок даних. По суті, таке СД буде більш схоже на вітрину даних. Після використання і за непотрібністю інформації воно очищується. Авторами розроблено структуру віртуального СД з використанням CASE-засобу CA AllFusion ERwin Data Modeler, а здійснена його реалізація в MS SQL Server. Структура СД є гібридною, адже поєднує в собі реляційну та ненормалізовану структуру. Вибірка та накопичення даних у СД здійснюється з використанням MS SQL Server Integration Services. Це дозволяє створювати та налаштувати способи отримання даних з будь-яких електронних джерел, здійснити їх трансформацію (розбиття, об'єднання, збагачення, перетворення типів), завантаження до СД. При завантаженні даних відразу усувається їх надлишковість та повторення. Після застосування та за необхідністю СД очищується, а для нового використання буде завантажено заново з оновленими даними. Такий підхід забезпечує роботу інформаційної технології тільки з актуальною для неї інформацією. У СД завантажуються наступна інформація: про стан технологічного обладнання та його характеристики по експлуатації, наявну сировину, актуальний план надходження сировини на підприємство, умови актуальних договорів, усі необхідні деталі договорів (розміри штрафів при запізненні виконання, загальні умови) та замовлень (терміни, види продукції, обсяги, терміни), що надійшли на даний момент, особливості етапів технологічної послідовності виготовлення на існуючому обладнанні, техніко-економічні показники, повна інформація про стан виконання поточного плану, детальна інформація замовлень, включених у поточний план тощо.

Спочатку відбувається отримання замовлення та аналіз умов його виконання. Якщо на даний момент не виконується ніяких планів відбувається аналіз стану технологічного обладнання з метою з'ясування запланованих ремонтно-профілактичних робіт обладнання і з'ясування можливості їх відкладення чи

перенесення. Чітко формуються планові дати початку та закінчення плану виконання замовлення.

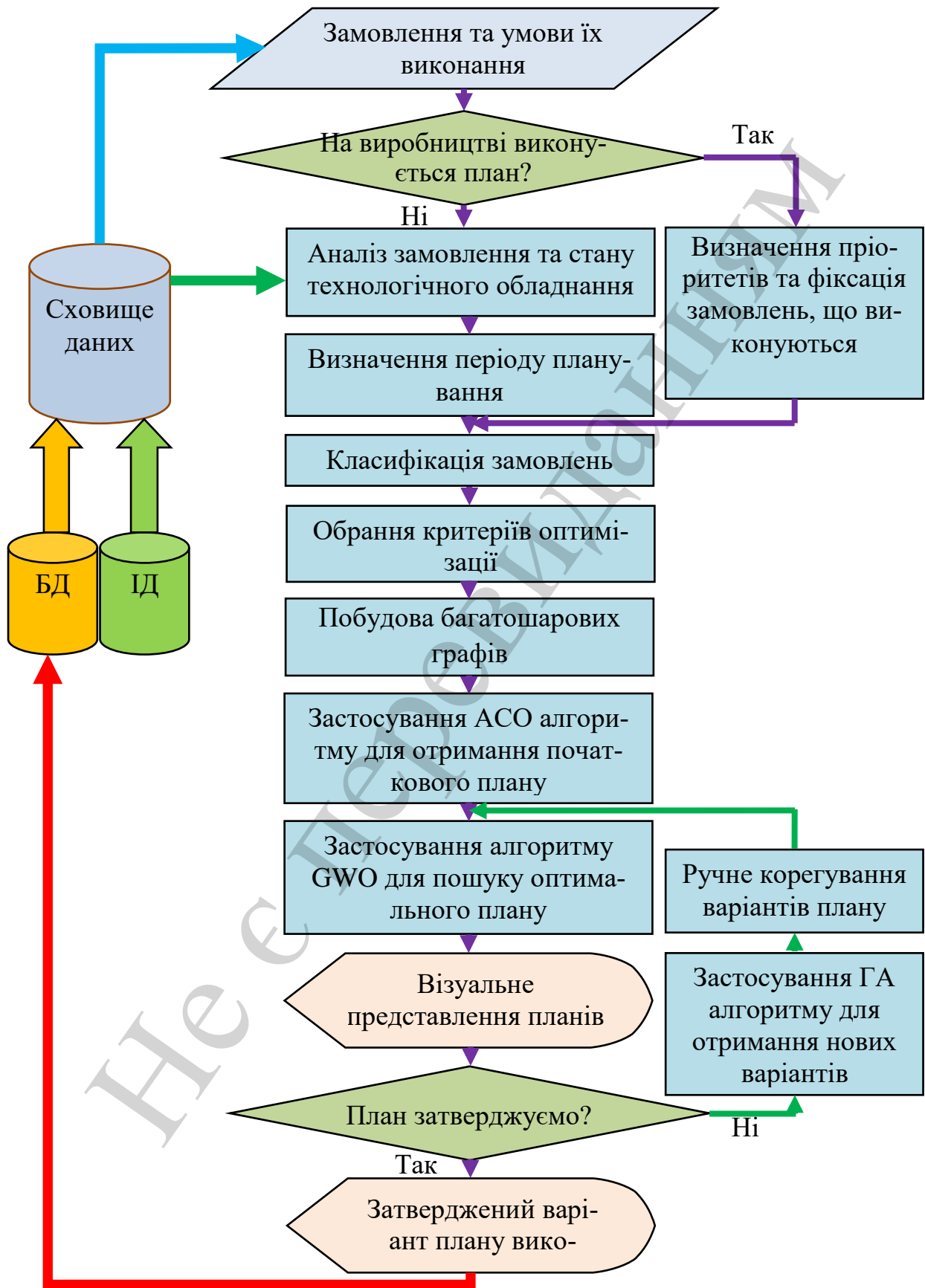


Рис. 2. Схема інформаційної технології планування виконання замовлення

Якщо на виробництво надійшло термінове замовлення, або виникла позаштатна ситуація (перебої із сировиною, зупинка обладнання, відклик певного замовлення тощо), що вимагає реконфігурації плану виконання замовлень, тоді ОПР повинен виділити в існуючому плані групи замовлень які повинні виконатися обов'язково, або навпаки. Фактично визначити можливість повної чи часткової реконфігурації плану, що виконується на даний час.

Далі відбувається класифікація замовлень по групах з використанням алгоритму дерева рішень. Вибір даного алгоритму обумовлений його можливістю на основі параметрів класифікації представляти об'єкти у вигляді ієрархії, в якій кожному елементу відповідає єдиний вузол прийняття рішення [1, 12, 13].

Перевагами алгоритму є швидкий процес навчання, генерація інтуїтивно зрозумілих правил, можливість опису непараметричних моделей, висока точність прогнозу порівняно з іншими методами (статистика, нейронні мережі). Даний алгоритм ідеально підходить для опису непараметричних моделей.

Алгоритм дерева рішень забезпечує представлення результуючих даних в компактній формі з точним описом об'єктів за рахунок класифікації за певними ознаками.

Для прикладу пояснення використання алгоритму дерева рішень оберемо макаронне виробництво і виконаємо наступну послідовність дій:

- усі замовлення поділяються на короткорізані та довгорізані макаронні вироби. Для випуску кожного типу макарон будуть використовуватись різні технологічні лінії, а замовлення будуть виконуватись незалежно;

- кожна підгрупа розбивається на підгрупи, що класифікуються за певними видами пакування;

- проводиться ранжування усіх замовлень за термінами визначеними у замовленнях;

- за можливістю замовлення об'єднуються або розміщуються поряд;

- визначаються розміри штрафів при порушенні термінів виконання замовлень.

В залежності від виду продукції та необхідності використання певних відділів чи обладнання визначається кількість планів які будуть виконуватись паралельно.

На наступному етапі ОПР обирає ряд критеріїв, які будуть враховуватись при розв'язанні та оцінці оптимальності плану виконання замовлень. Обрання критеріїв здійснюється згідно соціально-економічній ситуації, а також в залежності від стратегічних напрямків розвитку підприємства в цілому.

Далі для кожного плану будують багатошаровий граф. Вузли графа – це стан вибору та переходу між одним етапом та до наступного. Ребра, які поєднують два вузла, відображають процес виконання певного етапу. Загальною тривалістю виконання певного етапу позначаємо вагу кожного ребра. Для усунення можливої затримки виконання певного етапу додається ще одно додаткове ребро між сусідніми вузлами, що забезпечить перехід, якщо не можливо виконання жодного іншого етапу. Формування графу здійснюється для наочності та при застосуванні метаевристичних алгоритмів. Один шар графа відповідає технологічному обладнанню. Кожен вузол відповідає певному моменту часу, а

зупинка в ньому не обов'язково вимагає необхідність переходу до наступного вузла іншим ребром. Це забезпечує узгодженість між виконаннями етапів на різному технологічному обладнанні [1].

На наступному етапі для отримання перших наближених варіантів розкладу використовується модифікований АСО алгоритм, запропонований авторами [1, 14], якій полягає у імітації принципу дій мурашиної колонії. Умовою отримання варіанту плану виконання замовлень є відвідання усіх різних ребер, крім ребер, які відповідають затримці, кожного шару графа для формування одного повного шляху. На кожній ітерації згенеровані штучні мурахи здійснюють пошук шляху на графі згідно обраних ОПР часткових критеріїв або загальної згортки критеріїв. Для пошуку екстремальних значень цільової функції на кожній ітерації використовується визначена кількість штучних мурах, які будують таку відповідну кількість варіантів розкладу виконання замовлень. Використовуючи цільову функцію та часткові критерії математичної моделі складання плану виконання замовлень здійснюється відбір найкращих. Відібрані варіанти зберігаються та використовується незалежно один від одного на наступних ітераціях. Кожен агент діє за правилами ймовірнісного алгоритму та при виборі напрямку орієнтується не тільки на прирощення цільової функції, а й на статистичну інформацію, що відображає попередню історію колективного пошуку [1, 4]. Але якщо процес виготовлення готової продукції складається менше ніж з трьох технологічних операцій на різному технологічному обладнанні, що може бути розташовано на різних виробничих ділянках, є можливість відразу перейти до оцінки отриманих варіантів.

Для уникнення отримання псевдо-плану, що може бути тільки локально-оптимальним застосовується алгоритм зграї сірих вовків (GWO – Grey Wolf Optimizer), що моделює процес їх полювання в природі. Відповідно до задачі формування плану виконання, зграя полює за жертвою, яка відповідає оптимальному оперативному плану виконання замовлень. Кожен вовк зграї відповідає альтернативному оперативному плану на кожній ітерації. Після виконання кожної ітерації для кожного вовка розраховується значення його альтернативного оперативного плану використовуючи часткові критерії або оціночну функцію. За значенням оцінки кожного вовка у зграї їх розділяють на чотири типи: «альфа» – вовк ватажок, оцінка якого має оптимальне рішення за частковими критеріями або оціночною функцією, які відповідають створеній математичній моделі, наведеній у порівнянні з іншими агентами; «бета» та «дельта» – це вовки, які заганяють жертву, оцінки яких займають друге та третє місце серед найкращих; «омега» – усі інші [15–18]. Перші три типи вовків фіксуються на наступні ітерації, до тих пір поки не буде знайдено нові альтернативні варіанти рішення, що будуть кращі поточних, або буде вичерпана задана кількість ітерацій. Вовки «альфа», «бета», «дельта» впливають на формування «омега» вовків.

На першій ітерації кожному вовку популяції присвоюється одне замовлення, без повторення, а потім для кожного вовка формується своя популяція з використанням генератора випадкових чисел, що виключає повторення номерів замовлень, якщо таке було вже згенеровано для цього агента. В якості «альфа»,

«бета» та «дельта» на першій ітерації використовують найкращі варіанти отриманні при застосуванні АСО алгоритму.

Модифікація полягає у корегуванні кількості альфа, бета та дельта популяцій, що прискорює пошук, але збільшує час роботи алгоритму. На перших ітераціях використовуємо отримані варіанти з попереднього етапу для зменшення часу пошуку та збільшення кількості популяцій. Використовуючи GWO алгоритм, отримуємо варіанти планів виконання замовлень.

Використовуючи діаграму Ганта виводимо отриманні варіанти виконання замовлень, що дозволяє візуально оцінити послідовність виконання етапів, а для порівняння оцінки кожного з варіантів використовується пелюсткова діаграма.

Якщо менеджер, який виступає в ролі ОПР, приймає та затверджує один з варіантів виконання замовлень, то воно приймається та передається до виробничих підрозділів. А прийнятий план записується у базу даних підприємства.

Якщо отримані варіанти виконання замовлень не задовольняють менеджера здійснюються частково або повністю наступні дії:

- фіксація певних частин варіантів плану виконання замовлень, або навпаки штучна заміна послідовності виконання замовлень;
- для формування нових варіантів, що матимуть застосовується генетичний алгоритм (ГА).

Використання ГА обумовлено тим, що він використовує ітераційний підхід поліпшення результатів в околі відібраних найкращих варіантів [19, 20]. Якщо таке рішення знайдено, воно стає поточним і починається нова ітерація. На кожній ітерації використання операцій мутації, кроссоверу та схрещування забезпечує швидке отримання нових модифікованих варіантів планів виконання замовлень. Це продовжується до тих пір, поки не буде виконана задана кількість ітерацій. Таким чином ми отримуємо нові варіанти які подаються на етап з використанням АСО алгоритму.

Важливо зазначити, що результат роботи залежить не лише від кількості договорів, а й від кількості етапів, які необхідно виконати для виготовлення продукції, а також від кількості варіантів технологічного обладнання.

Поєднання трьох алгоритмів в одну інформаційну технологію забезпечує знаходження складних варіантів виконання розкладу на багатоміноменклатурних підприємствах харчової галузі.

Було проведено порівняння запропонованої технології з різними окремими комбінованими алгоритмами формування оптимального плану виконання замовлень. Апробація роботи запропонованої інформаційної технології проводилася на основі статистичних даних на українських підприємствах харчової промисловості, а саме на макаронному підприємстві, молокопереробному підприємстві та підприємстві по виготовленню ковбасних та м'ясних виробів.

Ефективність інформаційної технології запропоновано оцінити на основі роботи комбінування АСО (мурашиної колонії) алгоритму, для отримання початкового плану, алгоритму GWO (сірих вовків), для пошуку оптимального плану, а ГА (генетичного алгоритму), для отримання нових варіантів. Для оцінки ефективності комбінування алгоритмів використовуються наступні показники: час пошуку оптимального розкладу; кількість ітерацій здійснених для по-

шуку; ефективність знайденого плану (визначається як відхилення від оцінки фактичного плану за цільовою функцією); скорочення часу виконання замовлень (розраховується як різниця між фактичним та запропонованим планом).

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 та 100 замовлень. В табл. 1 наведено порівняння застосування алгоритмів та запропонованої інформаційної технології для даних отриманих на ТОВ «Слобожанський бекон» (Україна).

Таблиця 1

Порівняння застосування інформаційної технології з алгоритмами

№ п/п	Назва алгоритму	Кількість замовлень	Час пошуку оптимального плану, хв	Кількість ітерацій здійснених для пошуку	Ефективність знайденого плану, у. о	Скорочення часу виконання замовлень, год
1	Комбінування алгоритмів АСО, GWO та ГА	25	4	356	412	2
		50	9	836	1234	15
		75	14	1245	1637	10
		100	21	1689	4678	36
2	Алгоритм зграї вовків	25	8	759	1836	1
		50	12	973	367	7
		75	19	1578	1637	10
		100	37	1971	4325	30
3	Алгоритм мурашиної колонії	25	7	532	412	2
		50	15	798	591	10
		75	21	1311	1724	13
		100	39	1699	4325	30
4	Генетичний алгоритм	25	7	793	329	0
		50	12	798	757	8
		75	35	1821	1356	12
		100	43	2169	2125	24

Порівняння запропонованої комбінації алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків та генетичного, що складають частину розробленої інформаційної технології, з іншими класичними їх формами можливо тільки в межах кожного підприємства, адже кожне має власні параметри та показники діяльності. За результатами порівнянь запропонована комбінація алгоритмів у технології значно виграє за часом, адже усі алгоритми обмежені по кількості ітерацій, а отриманий план виконання замовлень є більш оптимальним при збільшенні кількості вхідних даних.

Якщо використовувати окремо кожен алгоритм та його модифікації при збільшенні розмірності задачі, час на пошук збільшується. Наприклад, у порівнянні з АСО алгоритмом дана технологія при вхідній кількості замовлень біль-

ше 50 на макаронному підприємстві та підприємстві з виготовлення ковбасних і м'ясних виробів знаходить більш оптимальне рішення швидше на 20–30 %. А при порівнянні з класичними методами витрати часу зменшуються до 70–80 %.

У випадку реконфігурації діючого плану виконання замовлень запропонована технологія дозволяє використовувати поточний план в якості першого наближення, що скорочує час пошуку.

## **6. Обговорення результатів розробки та застосування інформаційної технології**

У роботі створена інформаційна технологія формування та реконфігурування оперативних календарних планів виконання замовлень, схема якої наведена на рис. 2. Основою технології є запропонована комбінація використання алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків та генетичного, робота яких базується на математичній моделі планування виконання замовлень для харчового підприємства. Комбінація алгоритмів забезпечує уникнення зупинки алгоритму при знаходженні локального мінімуму.

Запропонована технологія дає можливість вирішення основної задачі прийняття рішень будь-якого підприємства, а саме формування оптимального плану виконання замовлень з мінімізацією часу та затрат.

Запропонована інформаційна технологія забезпечує виконання договорів з наступними перевагами:

- оперативно формує оперативно-календарний план виконання замовлень з мінімізацією витрат та направлений на максимізацію прибутку;
- оперативно та гнучко реконфігурує існуючий календарний план замовлень, що дає можливість реагувати на замовлення в реальному часі та забезпечує оптимальне використання технологічного обладнання;
- значно збільшує ефективність використання сировини та матеріалів, а також забезпечить мінімізацію витрат на їх зберігання;
- забезпечує швидке реагування при виникненні негативних та позаштатних ситуацій шляхом внесення відповідних змін до поточного плану виконання замовлень;
- чітко розподіляє усі задачі по виконанню кожного замовлення між виробничими підрозділами, що враховує послідовність виконання та необхідні ресурси з прив'язкою в часі;
- дозволяє оптимізувати використання виробничих потужностей.

Запропонована інформаційна технологія зменшує вірогідність прийняття некоректних управлінських рішень і відповідно убезпечує харчове підприємство від зайвих витрат при формуванні плану виконання замовлень.

Запропонована інформаційна технологія планування виконання замовлень при оперативному управлінні виробництвом має теоретичну та практичну цінність для фахівців у області менеджменту та інформаційних технологій.

За рахунок того, що технологія має гнучкі можливості застосування, її використання можливо на будь-якому підприємстві, крім дуже специфічних. Її можливо застосовувати не тільки для всього виробничого циклу, а й до окремих відділів.



За рахунок того, що створена математична модель враховує усі аспекти харчового виробництва, вона може бути застосована на будь-якому підприємстві цієї або спорідненої галузі. Запропонована інформаційна технологія ґрунтується на комбінуванні алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків та генетичного та розробленій математичній моделі, що дозволяє знаходити оптимальний план враховуючі обрані на момент прийняття рішення критерії.

Ефективність запропонованої технології полягає в тому, що комбінація алгоритмів забезпечує використання наближених варіантів планів знайдених попереднім алгоритмом. Тобто пошук відбувається не з нуля, а використовує наближені варіанти, що дозволяє уникнути локального оптимального значення. Все це обумовлено використанням комбінації трьох алгоритмів: мурашиного, сірих вовків та генетичного.

Актуальність запропонованої технології полягає у оперативному пошуку альтернативного варіанту виконання замовлень, адже виникнення позаштатних ситуацій та помилок загрожує підприємству отриманням суттєвих збитків. Наприклад, при виробництві макаронних виробів зупинка технологічної лінії фірми Ravan призведе до зменшення обсягів виготовлення продукції більше ніж на 10 тон.

До основних недоліків необхідно віднести те, що запропонована інформаційна технологія може не враховувати певні особливості нехарчових підприємств, а також не є корисною для невиробничих комерційних організацій, які займаються продажами товарів інших виробників. Також слід враховувати, що для коректного використання інформаційної технології необхідно забезпечити доступ до баз даних підприємства, а для повноти використання бажано до сховища консолідованих корпоративних даних.

Подальший розвиток дослідження та розробки направлено на створення окремого он-лайн сервісу, що дозволить реалізувати запропоновану інформаційну технологію та розміщення її у хмарному сервісі. Розроблений он-лайн сервіс планується зробити гнучким для подальшої інтеграції з існуючими інформаційними системами підприємств за рахунок окремого модуля інтеграції.

## **7. Висновки**

1. Розроблено математичну модель планування виконання замовлень з урахуванням основних особливостей діяльності підприємств харчової галузі. Математична модель враховує усі нюанси діяльності харчового підприємства та процесу планування виконання замовлень: терміни зберігання сировини та готової продукції, можливість виникнення та необхідність переробки некондиційної продукції, особливості виконання кожного окремого замовлення; особливості використання технологічного обладнання тощо. Для формування узагальненої цільової функції використовується адитивна згортка критеріїв. Розроблена математична модель дозволяє сформулювати план виконання замовлень із урахуванням усіх операцій технологічного процесу при виготовленні продукції. Також запропоновано використання пелюсткової діаграми для оцінки альтернативних варіантів планів в залежності від загальних економіко-соціальних впливів. Створена математична модель дозволяє коригувати та оцінювати ефективність виконання замовлень в залежності від об'єктивних та суб'єктивних пере-

ваг наданих ОПП, а також забезпечує як врахування так і виключення певних часткових критеріїв в залежності від певної ситуації.

2. Розроблена інформаційна технологія планування виконання замовлень забезпечує створення та коригування оперативно-календарних планів за короткий період часу. Швидкість реагування на виникнення позаштатних ситуацій зменшить збитки харчового підприємства та дозволить задовольнити вимоги замовників. За рахунок комбінування алгоритмів мурашиної колонії, сірих вовків та генетичного інформаційна технологія забезпечує формування альтернативних планів виготовлення продукції. Розроблена інформаційна технологія базується не на покращенні певного алгоритму, а на комбінації алгоритмів, що відрізняє її від традиційного підходу, а саме удосконалення конкретного алгоритму. Для оцінки ефективності альтернативних рішень та їх формування використовується створена математична модель. Запропонована технологія передбачає можливість впливу ОПП, а також повне його усунення при необхідності.

### Література

1. Hrybkov, S., Oliinyk, H., Litvinov, V. (2018). Web-oriented decision support system for planning agreements execution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (93)), 13–24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132604>
2. Kharkianen, O., Myakshylo, O., Hrybkov, S., Kostikov, M. (2018). Development of information technology for supporting the process of adjustment of the food enterprise assortment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (91)), 77–87. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123383>
3. 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), 116–123.
4. Senthilkumar, K. M., Selladurai, V., Raja, K., Thirunavukkarasu, V. (2011). A Hybrid Algorithm Based on PSO and ACO Approach for Solving Combinatorial Fuzzy Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem. *European Journal of Scientific Research*, 64 (2), 293–313.
5. Lin, Y.-K. (2017). Scheduling efficiency on correlated parallel machine scheduling problems. *Operational Research*, 18 (3), 603–624. doi: <https://doi.org/10.1007/s12351-017-0355-0>
6. Rodríguez, F. J., Lozano, M., García-Martínez, C., González-Barrera, J. D. (2013). An artificial bee colony algorithm for the maximally diverse grouping problem. *Information Sciences*, 230, 183–196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.12.020>
7. Sivaraj, R., Ravichandran, T., Devi Priya, R. (2012). Boosting Performance of genetic algorithm through Selective initialization. *European Journal of Scientific Research*, 68 (1), 93–100.
8. Арендателева, С. И. (2010). Математическое моделирование производственного планирования на малом предприятии. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика*, 2 (17), 97–109.

9. Бойко, Р. О., Грибков, С. В. (2019). Мережеві структури при керуванні складними організаційно-технічними (технологічними) системами. *Харчова промисловість*, 25, 116–123. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khp\\_2019\\_25\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khp_2019_25_17)
10. Sobchak, A., Lutai, L., Fedorenko, M. (2019). Development of information technology elements for decision-making support aimed at re-structuring production at virtual instrument-making enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (4 (101)), 53–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.182039>
11. 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*, 7 (7), 438. doi: <https://doi.org/10.3390/pr7070438>
12. Barker, K., Wilson, K. J. (2012). Decision Trees with Single and Multiple Interval-Valued Objectives. *Decision Analysis*, 9 (4), 348–358. doi: <https://doi.org/10.1287/deca.1120.0253>
13. Kamiński, B., Jakubczyk, M., Szufel, P. (2017). A framework for sensitivity analysis of decision trees. *Central European Journal of Operations Research*, 26 (1), 135–159. doi: <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0479-6>
14. Олійник, Г. В., Грибков, С. В. (2017). Модифікований АСО алгоритм побудови календарного плану виконання договорів. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, 15, 156–162.
15. Wu, H.-S., Zhang, F.-M. (2014). Wolf Pack Algorithm for Unconstrained Global Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–17. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/465082>
16. Zhang, Y., Balochian, S., Agarwal, P., Bhatnagar, V., Housheya, O. J. (2014). Artificial Intelligence and Its Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/840491>
17. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
18. Madadi, A., Motlagh, M. (2014). Optimal Control of DC motor using Grey Wolf Optimizer Algorithm. *Technical Journal of Engineering and Applied Science*, 4 (4), 373–379.
19. Yannibelli, V., Amandi, A. (2012). A deterministic crowding evolutionary algorithm to form learning teams in a collaborative learning context. *Expert Systems with Applications*, 39 (10), 8584–8592. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.195>
20. Jie Yao, Kharna, N., Grogono, P. (2010). Bi-Objective Multipopulation Genetic Algorithm for Multimodal Function Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 14 (1), 80–102. doi: <https://doi.org/10.1109/tevc.2009.2017517>