

УДК 519.854.2

Ф.Г. Ващук<sup>1</sup>, О.Б. Місюра<sup>2</sup>, О.О. Мельник<sup>1</sup><sup>1</sup> Закарпатський державний університет, Ужгород<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ", Київ

## ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЛГОРИТМІВ МІНІМІЗАЦІЇ СУМАРНОГО ВИПЕРЕДЖЕННЯ І ЗАПІЗНЕННЯ ІЗ НАЛАГОДЖЕННЯМИ

Розглядається інформаційне забезпечення алгоритмів розв'язання задач складання розкладів за критерієм мінімізації сумарного випередження і запізнення відносно директивних строків: при виконанні незалежних завдань одним приладом при наявності налагоджень залежних від послідовності (МВЗН) та при виконанні груп (МВЗГ) одним приладом із налагодженнями незалежними від послідовності. Описується загальна структура інформаційної системи ієрархічної моделі планування з мережевим представленням технологічних процесів.

**Ключові слова:** розклад групи, критерій мінімізації, інформаційна система, планування.

### Вступ

У даній статті розглядається інформаційна технологія задач мінімізації сумарного випередження та запізнення в системі ієрархічного планування. В статті [4] представлено алгоритм мінімізації сумарного випередження та запізнення з налагодженнями, в статті [5] – алгоритм мінімізації сумарного випередження та запізнення груп з налагодженнями для випадку, коли простої дозволені та коли простої приладу заборонені. Щоб було зрозуміло місце алгоритмів мінімізації сумарного випередження і запізнення в інформаційній системі ієрархічного планування [6], необхідно розглянути модель тривірневої системи планування. Новизна даної статті полягає в розробці інформаційної технології для задач МВЗН та МВЗГ. Так як представлення інформаційної технології алгоритмів для задач МВЗН [4] та МВЗГ [5] неможливе без комплексного подання ієрархічної системи планування, то стаття починається з огляду ієрархічної моделі планування [6], що закінчується більш детальним оглядом кожного із трьох рівнів системи. До пункту "Вхідні та вихідні дані алгоритмів мінімізації випередження і запізнення" приведено постановку та опис задачі, без якої не зрозуміло місце двох задач в тривірневій системі планування [6]. Далі, в наступній частині статті, приведено опис вхідних та вихідних даних модулів, що відповідають задачам МВЗН та МВЗГ, в рамках інформаційної системи. В розділі "Інформаційне забезпечення алгоритмів мінімізації випередження і запізнення" приводиться інформаційна структура алгоритмів задач МВЗН та МВЗГ, що показує їх взаємозв'язок і місце в ієрархічній системі планування. Приведено опис класів, що реалізують алгоритми розв'язання відповідних задач та спрощені діаграми діяльності трьох алгоритмів.

**Постановка задачі.** Останнім часом велика увага приділяється питанням вдосконалення планування, організації та управління на різних видах виробництва. Необхідність такого вдосконалення визначається зростанням масштабів виробництва, ускладненням еконо-

мічних і виробничих зв'язків. Створення системи календарного планування чи вдосконалення існуючої являє собою надзвичайно складне комплексне завдання.

*Постановка задачі планування.*

Нехай задана множина  $n$  комплексів взаємопов'язаних робіт  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  (комплекс робіт  $J_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , в подальшому називається завданням). На кожній підмножині  $J_i$  частковий порядок заданий орієнтованим ациклічним графом. Часткова впорядкованість зазвичай визначається технологією виконання комплексу робіт. Кожна наступна робота може початися тільки після завершення попередніх робіт. Вершини графа відповідають роботам, зв'язки вказують на відношення передування. Кінцеві вершини відповідають завершенню виконання завдань. Для кожної вершини  $j$  графа відома  $l_j$  – детермінована тривалість виконання (інтегрований показник, який відображає виділені ресурси – матеріальні, людські, виробничі, тривалість виконання кожного завдання визначається його критичним шляхом); для кожної роботи  $i \in I$  ( $I$  – множина кінцевих вершин, що ідентифікуються з множиною завдань) задана вага  $\omega_i$ ; для окремих завдань заданий директивний строк закінчення  $d_i$ . Для виконання робіт застосовується множина обмежених ресурсів. Сукупність ресурсів та виконавців розділена на окремі, достатньо автономні модулі – мультиресурси (мультиресурс – стійка група спільно працюючих ресурсів – наприклад, бригада, група однотипного обладнання, однопрофільне відділення). Мультиресурси можуть знаходитися як в одній, так і в різних організаціях. В загальному випадку, якщо це обумовлено виробничою необхідністю і дозволяє більш ефективно виконувати заданий об'єм робіт, то в склад мультиресурса може бути включене різноманітне обладнання. Необхідно побудувати загальний план виконання комплексів робіт мультиресурсами і розподіл виконання робіт по ресурсам з врахування критеріїв оптимальності. В даній статті ми розглянемо критерій загального випередження та запізнення (МВЗ).

Концепція врахування і випередження і запізнення відобразилася в ряді досліджень, в яких використовуються різноманітні моделі та цільові функції. Детальний огляд задачі з випередженням і запізненням був даний у [1]. Автори провели огляд літератури по роботам, пов'язаним з цією задачею. Було розроблено ряд моделей випередження і запізнення, деякі з них мають один директивний строк, інші різні директивні строки. Деякі моделі розглядають однакові штрафи за випередження і запізнення, в той час як інші враховують різні штрафи за випередження та запізнення.

У статті [2] задача планування з випередженням і запізненням розглядається з фіксованими часами простою на горизонті планування, такими як операції переналагодження та обслуговування машин. Автори запропонували евристичний алгоритм для задачі з різними часами наладки.

Як зазначено в [1], типова задача з врахуванням випередження і запізнення є NP-складною, навіть у випадку коли всі директивні строки однакові і всі роботи доступні для виконання з самого початку. Таким чином, розробка алгоритму, який би міг знаходити близькі до оптимального розкладу, дуже важливий. У [3] розглядається алгоритм, який використовує процедуру табу-пошуку для розв'язання даної задачі.

У даній статті розглядаються алгоритми задач МВЗН [4] та МВЗГ [5].

### **Загальна схема ієрархічної моделі планування**

В основу системи покладена ієрархічна модель планування, описана в [6]. Ця модель планування і управління складними системами, яка враховує мережеве представлення технологічних процесів і обмежені ресурси, складається з трьох рівнів: агрегованого, погоджувального і точного планування. Поставлена задача формування планів виконання робіт з прив'язкою до ресурсів вимагала створити розподілену систему побудови планів для кожного рівня управління. При цьому забезпечується чіткий взаємозв'язок розв'язків, прийнятий на кожному рівні. Розв'язання задачі мінімізації цільової функції на верхньому рівні управління є вхідною інформацією для ефективного розв'язання задач планування по визначеному критерію оптимальності на нижчих рівнях ієрархії. Це дозволило створити систему взаємопов'язаних алгоритмів, що дозволило розв'язувати задачі планування в комплексі.

У відповідності з трирівневою моделлю, побудова розподілу робіт по ресурсам відбувається в три етапи.

Завдання першого етапу полягає в побудові агрегованої моделі, на якому модель планування представляється в виді одного станка. На основі агрегованої інформації будується граф на критичних шляхах завдань. Вершини отриманого графу – це агреговані роботи, дуги вказують на зв'язки між мультиресурсами, які регламентують технологію виконання завдань. Кі-

нцеві вершини відповідають виконаним завданням. Для визначення черговості виконання завдань відповідно критерію оптимальності важливим є розв'язок на першому рівні задачі мінімізації зваженого сумарного моменту закінчення виконання завдань (МЗМ) для випадку, коли вагові коефіцієнти всіх вершин графу зв'язності, крім кінцевих, рівні нулю.

Вхідна інформаційна модель першого етапу представляє собою базу даних з інформацією про завдання (комплексах взаємопов'язаних робіт), які входять в портфель замовлень, їх директивних строків та ваги, що характеризує важливість завдань. На кожному комплексі взаємопов'язаних робіт задана часткова впорядкованість, яка визначається технологією виконання завдань. Визначена тривалість виконання робіт з прив'язкою до ресурсів. Задается інформація про мультиресурси і календар робочих днів. Перетворення вхідної інформації в інформаційну модель заданого виду і її перевірка здійснюються на початку першого етапу.

На першому етапі для кожного із критеріїв оптимальності будується апроксимуюча задача мінімізації зваженого сумарного моменту закінчення виконання завдань, в результаті розв'язку якої формується пріоритетно-впорядкована послідовність агрегованих робіт, яка визначає черговість їх виконання. Таким чином, в результаті виконання першого етапу формується масив агрегованих робіт, в якому їх підпослідовності впорядковані по спаданню пріоритетів, що визначають черговість виконання завдань.

Другий етап полягає в побудові узгодженого плану виконання завдань з врахуванням критерію оптимальності. Для випадку задачі мінімізації сумарного випередження та запізнення перед початком алгоритму виконується оптимізація послідовності агрегованих завдань по алгоритму розв'язання задачі мінімізації сумарного запізнення. Якщо в результаті в послідовності відсутні резерви, то ця послідовність є оптимальною і по критерію МВЗ. В іншому випадку виконується оптимізація за алгоритмом мінімізації загального запізнення.

На вхід на другий рівень інформаційної системи поступає пріоритетно-впорядкована послідовність агрегованих робіт. Для кожної агрегованої роботи відома тривалість її виконання, ваговий коефіцієнт, директивний строк. Пріоритети агрегованих робіт, визначені на першому рівні, слугують додатковою інформацією, що дозволяє значно підвищити ефективність отриманих рішень.

Побудовані на другому рівні моделі узгоджені плани виконання завдань по заданим критеріям оптимальності передаються на наступний рівень. Таким чином, вихідною інформацією на другому рівні є розподіл агрегованих робіт оптимальної послідовності  $\sigma^{OPT}$ , доповненої вершинами, які не лежать на критичних шляхах, для обслуговування їх множиною мультиресурсів з прив'язкою до планового періоду.

Процедури третього рівня дозволяють у відповідності з отриманим планом виконання агрегова-

них робіт мультиресурсами побудувати розподіл робіт по ресурсам (так зване точне планування), тобто здійснити дезагрегацію мультиресурсів на окремі ресурси, агреговані роботи – на окремі роботи, що входять в їх склад.

Вхідні дані. На вхід мультиресурса, представленого множиною однотипних ресурсів  $M = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ , поступає множина агрегованих робіт, що належать різним завданням, які необхідно виконати.

Кожна агрегована робота – це сукупність окремих робіт із заданим відношенням порядку.

Для кожної агрегованої роботи відомий момент початку та тривалість виконання; для кінцевих робіт, що відповідають виконаним завданням, задана вага, для деяких відомий ще директивний строк завершення.

Для кожної окремої роботи, що входить до складу агрегованої роботи, відома тривалість її виконання протягом неперервного інтервалу часу, ніяка робота не може бути перервана. Кожний ресурс може виконувати тільки одну роботу, і кожна робота може виконуватися тільки одним ресурсом одночасно.

На виході третього рівня отримується повний погоджений план виконання всіх робіт для кожного ресурсу у відповідності до вибраного критерію оптимізації. В результаті, для кожної роботи визначається точний час початку її виконання та ресурс, який повинен виконувати цю роботу.

Таким чином, загальну структуру інформаційного забезпечення ієрархічної системи планування з

критерієм мінімізації сумарного випередження і запізнення із налагодженнями можна представити у вигляді схеми, показаної на рис. 1, 2.

### Перший рівень моделі

При розв’язуванні задач планування в системах з мережним представленням технологічних процесів логічно використовувати трирівневу взаємозв’язану модель планування, яка з достатньою деталізацією дозволяє описувати плановані виробничі процеси.

У відповідності з вихідною постановкою задачі на основі детальної інформації, пов’язаної з завданнями, ресурсами і технологією виробництва, на першому рівні трирівневої моделі планування буде агрегована модель за допомогою об’єднання окремих ресурсів та операцій в більшій одиниці.

Однією з переваг розробленої моделі [6] є прийнятні способи агрегації, що базуються на пошуку схожості в межах виробничої системи і структури завдання і використанні цієї схожості для скорочення виробничого циклу виконання завдань. Це дає змогу покращити якість і підзвітність, покращити навчання працівників, підвищити ефективності поставок, знизити рівень незавершеності виробництва, отримання високої продуктивності та сумарної гнучкості. Основою для цих переваг є спрощення задачі планування, більш просте проведення загальної координації виконання завдань в системі. Ієрархічна декомпозиція задачі планування робить питання про координацію всередині системи легко розв’язуваним.

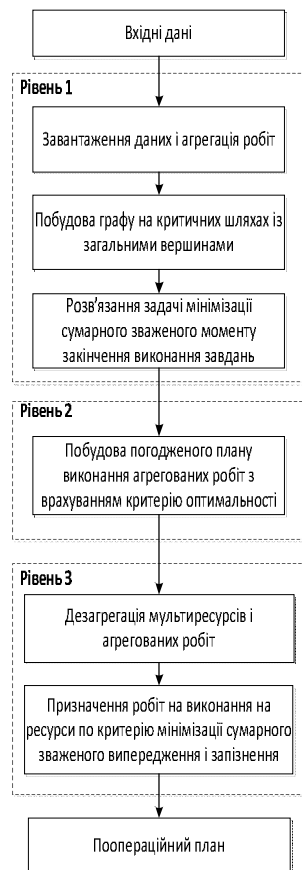


Рис. 1. Схема інформаційної моделі

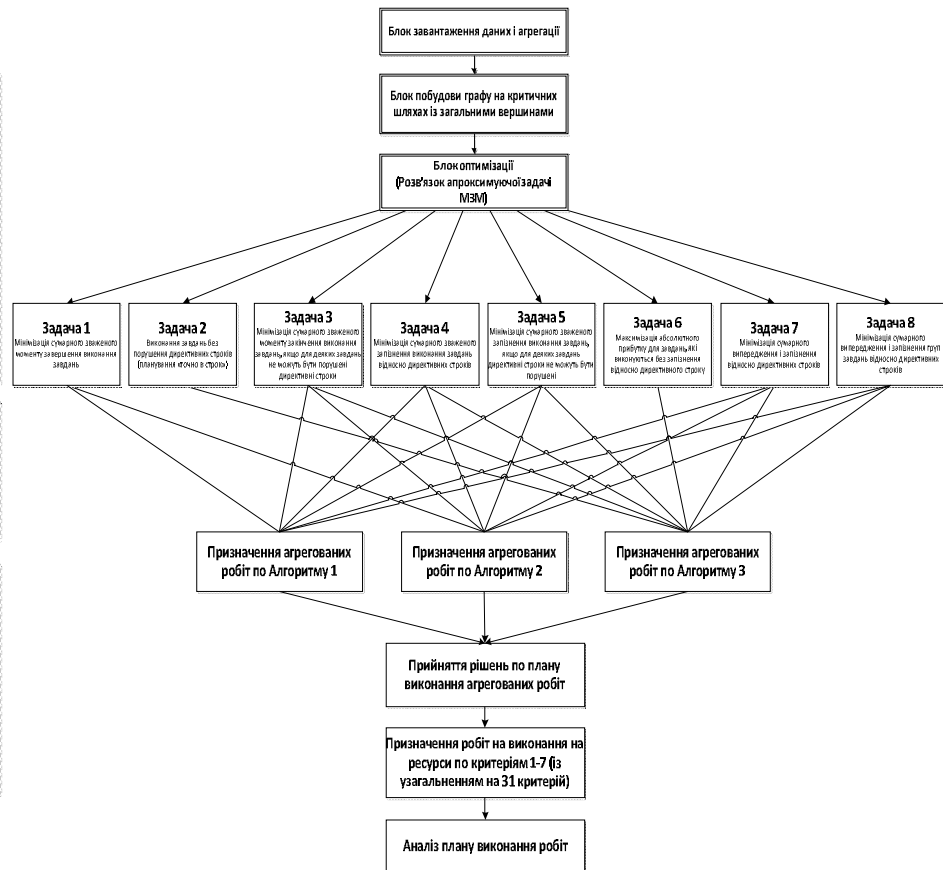


Рис. 2. Схема взаємозв’язку алгоритмів ієрархічної системи планування

Побудова пріоритетно-впорядкованої послідовності агрегованих робіт, що визначає черговість запуску їх на виконання по заданим критеріям оптимальності.

Для визначення черговості запуску завдань на виконання на першому рівні моделі на побудованому графі на критичних шляхах завдань розв'язується задача МЗМ для випадку, коли вагові коефіцієнти всіх вершин, крім кінцевих, рівні нулю. Для розв'язання цієї задачі невідомі ефективні методи розв'язку. В роботі [6] представлений ефективний точний ПДС-алгоритм розв'язання задачі в загальному випадку при довільних вагах. Для розв'язання даної задачі запропонований ефективний евристичний алгоритм, побудований на точному ПДС-алгоритмі. Розроблений евристичний алгоритм дозволяє за прийнятний час розв'язувати практичні задачі з десятками тисяч змінних.

Таким чином, для даного критерію оптимальності будується апроксимуюча математична модель задачі МЗМ, яка враховує властивості досліджуваних задач. Пріоритети, які визначають черговість виконання завдань, отримані в результаті розв'язку задачі МЗМ, служать основною інформацією при розробці алгоритмів планування другого і третього рівнів моделі.

Таким чином, послідовність дій на першому рівні трирівневої моделі планування можна зобразити на схемі (рис. 3).

### Другий рівень моделі

Другий рівень моделі [6] слугує для побудови погодженого плану виконання агрегованих робіт в моделі (рис. 4). Реалізація погодженого планування заснована на наступних принципах:

1. Максимальне наближення тривалості проходження кожного завдання в моделі до його критичного шляху, що дозволяє:

- зменшити об'єми незавершених робіт;
- зменшити тривалості виконання завдань;
- скоротити простої і тим самим збільшити виробничу потужність;

2. Завдання, для яких відсутні директивні строки, назначаються у відповідності з їх пріоритетами по правилу: чим більший пріоритет завдання (групи завдань), тим раніше воно повинно бути призначене на виконання.

3. Завдання з директивними строками назначаються на виконання в порядку, визначеному пріоритетно-впорядкованою послідовністю максимально близько до директивного строку: чим більше пріоритет, тим менше відхилення виконання завдання від директивного строку.

Таке призначення завдань на виконання обумовлено специфікою приведених функціоналів і до-

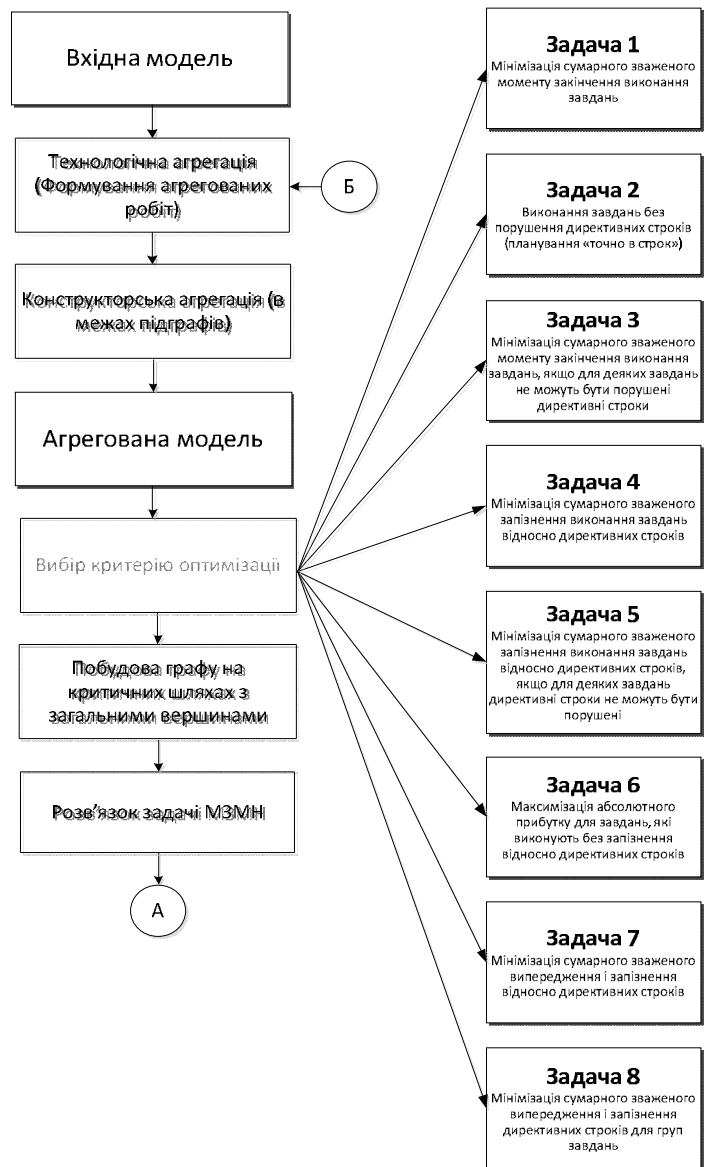


Рис. 3. Схема першого рівня моделі

зволяє отримати ефективні розв'язки, близькі до оптимальних.

Після побудови пріоритетно-впорядкованого розкладу  $\sigma^{OPT}$  необхідно розподілити по мультиресурсам всі агреговані роботи, які лежать на критичних шляхах завдань. Для уточнення об'єднання агрегованих робіт в «загальні вершини» здійснюється двократний розподіл даної послідовності.

### Третій рівень моделі

На третьому рівні моделі [6] (рис. 5) здійснюється дезагрегація мультиресурсів на окремі ресурси, агрегованих робіт на окремі роботи, що входять до їх складу. На цьому рівні будується повний план виконання робіт з прив'язкою до ресурсів (точне планування), який реалізує порядок та строки виконання агрегованих робіт і отриманий в результаті погодженого планування на другому рівні моделі. На цьому рівні розв'язуються задачі як для одного, так і для паралельних станків для випадку незалежних і взаємопов'язаних завдань за обраним критерієм.

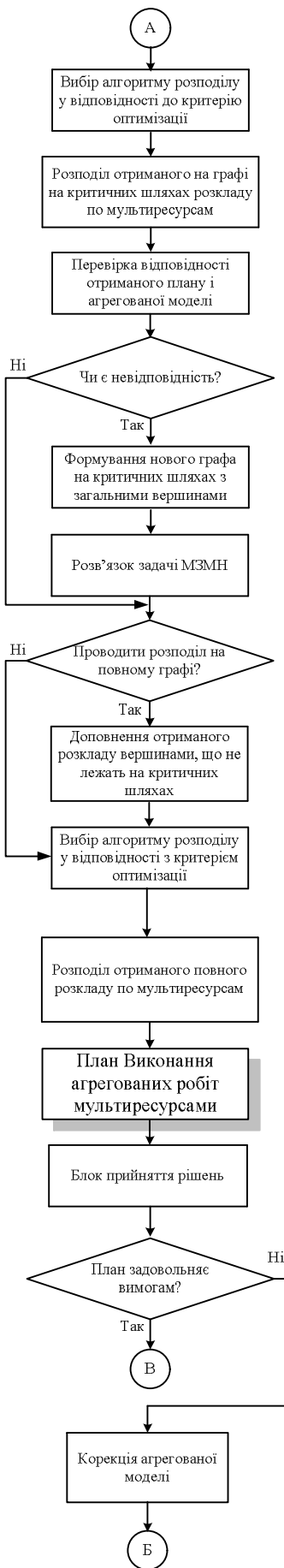


Рис. 4. Другий рівень моделі

При побудові алгоритмів планування використовуються пріоритети запуску завдань на виконання, отримані при розв'язку задачі МЗМ на першому рівні моделі, а також алгоритми розподілу, розглянуті раніше.

Алгоритмічне забезпечення третього рівня включає ПДС-алгоритми задачі мінімізації сумарного запізнення з одним станком і задачі мінімізації сумарного запізнення з паралельними однотипними станками.

**Особливості задачі МВЗ**

*Постановка задачі.* Множина з n незалежних завдань  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$  повинна бути призначена на виконання без переривань на одному приладі, який може працювати не більш, ніж з одним завданням одночасно. Прилад і завдання передбачаються безупинно доступними з моменту часу нуль, а простої приладу не допускаються. Завдання j, де  $j = 1, 2, \dots, n$ , вимагає часу виконання  $p_j$  і в ідеалі повинне бути закінчене у свій директивний строк  $d_j$ . Для окремих завдань задано час налагодження  $s_{ij}$ , це означає, що в розкладі, у якому завдання j виконується відразу після завдання i, повинен бути час налагодження  $s_{ij}$  одиниць часу між моментом завершення завдання i, позначеним через  $C_i$ , і часом початку завдання j, що дорівнює  $C_j - p_j$ . Протягом цього періоду налагодження ніяке інше завдання не може бути виконано приладом. Часи налагодження є залежними від послідовності, тому що вони за-

лежать як від i, так і від j. Для будь-якого заданого розкладу випередження та запізнення завдання j можуть бути визначені виразами (1) і (2). Мета полягає в тому, щоб знайти розклад, який мінімізує сумарне випередження і запізнення всіх завдань:

$$\sum_{j=1}^n (E_j + T_j),$$

де випередження і запізнення визначаються як, відповідно,

$$E_j = \max(0, d_j - C_j) = (d_j - C_j)^+, \quad (1)$$

$$T_j = \max(0, C_j - d_j) = (C_j - d_j)^+. \quad (2)$$

Для задачі мінімізації сумарного запізнення та випередження в якості агрегованої моделі першого рівня вибирається спеціальним чином побудована апроксимуюча задача МЗМ. Розглянемо доцільність апроксимації та особливості розв'язку даної задачі на першому та другому рівні.

*Примітка.* У даній задачі діє обмеження, згідно з яким тривалість виконання кожного завдання і агрегованих робіт визначається критичним шляхом. Позначимо через i та j номер завдання у відповідності з індексацією, заданою функціоналом;  $j_{[g]}$  – номер роботи, що стоїть в допустимому розкладі на позиції g.

У задачі мінімізації сумарного запізнення та випередження для всіх завдань задані директивні строки  $d_i$ . Необхідно мінімізувати сумарний штраф як за випередження, так і за запізнення відносно директивних строків:

$$\min \sum_{i=1}^n \xi_i |C_i - d_i|,$$

де  $\xi_i$  – штраф за відхилення моменту закінчення виконання i-го завдання від директивного строку на одиницю часу.

Необхідність апроксимації задач планування першого рівня відповідними задачами МЗМ обґрунтована наступними причинами: 1) глибокий зв'язок між всіма задачами, що розв'язуються системою; 2) створення ефективного наближеного алгоритму для розв'язку задачі МЗМ першого рівня, що базується на ідеях ПДС-алгоритму для задачі МЗМ.

**Особливості задачі МВЗГ**

Існують випадки, коли необхідно щоб певні групи завдань, що призначаються на виконання, виконувалися разом. Цей підхід полягає в розді-

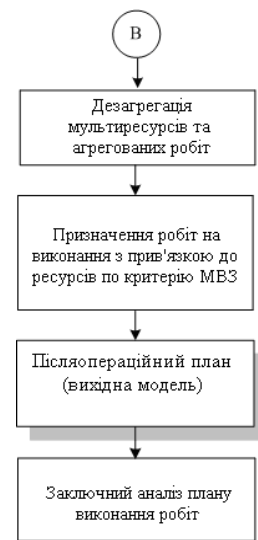


Рис. 5. Третій рівень моделі

ленні усієї множини робіт у декілька підмножин, названих сімействами, де сімейство – підмножина робіт, які мають схожі вимоги з погляду обладнання й налагоджень. Для розв’язання таких задач було розроблено два алгоритми [5] мінімізації сумарного випередження та запізнення груп завдань для одного приладу із налагодженнями (МВЗГ). Вона відрізняється від задачі МВЗ тим, що задано число сімейств, позначене  $f$ , і кількість завдань в кожному сімействі, представлена числом  $p_i$  для сімейства  $i = 1, \dots, f$ , які повинні бути виконані без переривання на одному приладі. Тривалість виконання і директивний строк  $j$ -го завдання з сімейства  $g_i$  визначені як  $p_{ij}$  і  $d_{ij}$  відповідно. Крім того, якщо завдання слідує за попереднім завданням з того ж сімейства, то між ними немає часу налагодження; інакше потрібен час налагодження сімейства  $S_{g_i}$  перед наступним процесом виконання. Звернемо увагу, що  $S_{g_i}$  не залежить від позиції, займаної сімейством. Усі завдання доступні в момент часу нуль, простої приладу допускаються, а переривання завдань заборонено. Для будь-якого заданого розкладу випередження та запізнення завдання визначається за формулами, як для задачі МВЗ. Мета полягає в тому, щоб знайти розклад, який мінімізує сумарне випередження і запізнення всіх завдань. Алгоритми засновані на методі розв’язання задачі МВЗ, викладеному в [6]. Перший алгоритм використовується у випадках, коли простої приладів дозволені, а другий – коли заборонені.

### Вхідні та вихідні дані алгоритмів мінімізації випередження і запізнення

Підсистема алгоритмів мінімізації сумарного випередження і запізнення, що складається з двох алгоритмів, викликається ієрархічною системою планування. Передача інформації здійснюється в чітко визначеній формі відповідно до тих даних, що необхідні для кожного алгоритму. Розгляд форми вхідних та вихідних даних неможливий без комплексного представлення модулів в складі системи ієрархічного планування. Для більш наглядного зображення місця алгоритмів МВЗ скористаємося UML-діаграмами, що є представленням компонентів або елементів системи чи моделі процесу і в залежності від виду діаграми дозволяють показати, яким чином ці елементи пов’язані або взаємодіють з певної точки зору.

Для зображення складових частин програмного забезпечення, особливостей фізичного представлення системи застосовується діаграма компонентів (component diagram). Вона дозволяє визначити архітектуру програмного забезпечення, встановивши залежності між програмними компонентами, в ролі яких може виступати вихідний код чи виконуваний код.

Діаграма компонентів дозволяє показати місце модуля розв’язання задач мінімізації сумарного випередження та запізнення в ієрархічній системі планування, а також ті модулі, з яких він складається (рис. 6).

На діаграмі компонентів показані основні модулі, з яких складається система планування.

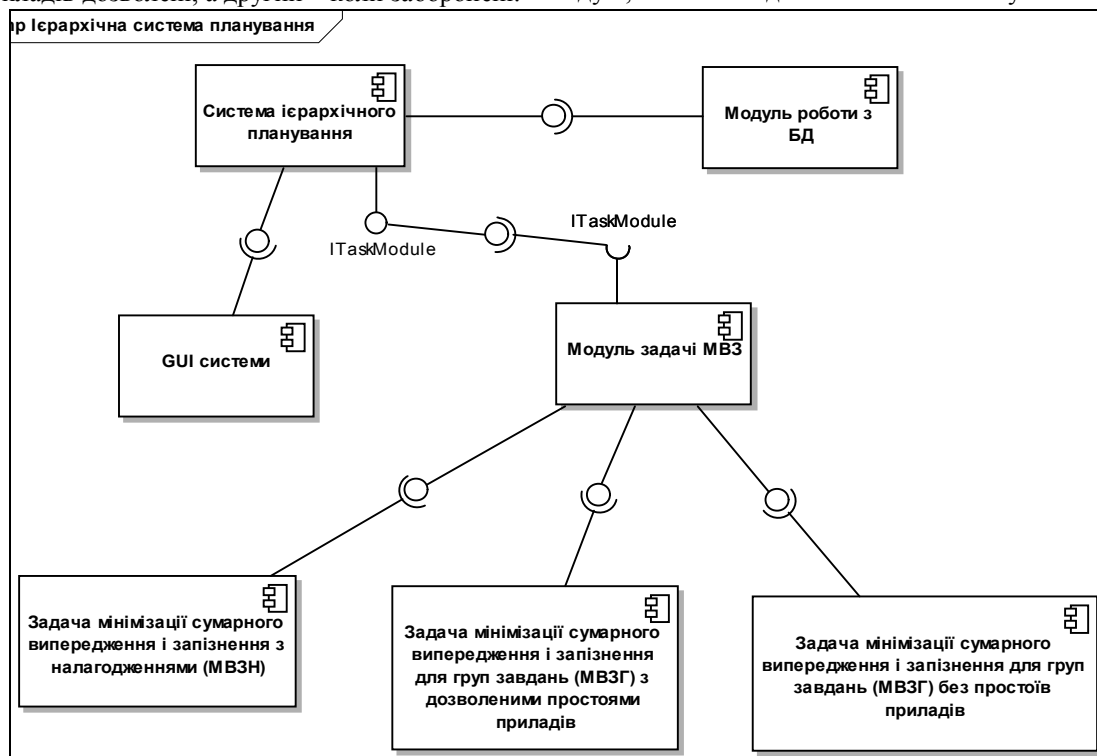


Рис. 6. Діаграма компонентів

Головним модулем є система ієрархічного планування. Вона пов’язана зв’язками з модулем, що здійснює роботу з базою даних та графічним

інтерфейсом користувача. Також універсальна система ієрархічного планування дозволяє підключати окремі модулі, що здійснюють оптимізацію за пев-

ним критерієм оптимальності. Для цього вона описує спеціальний інтерфейс, який повинен наслідуватися всіма модулями. В даному випадку 3 модулі реалізують інтерфейс ITaskModule. Це модулі розв'язання задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення з налагодженнями (МВЗН), задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення для груп завдань (МВЗГ) з дозволеними простоями приладів та задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення для груп завдань (МВЗГ) без простоїв приладів.

Модулі задач МВЗН та МВЗГ викликаються на третьому рівні моделі ієрархічного планування. Всі вхідні дані поступають з блоку "Дезагрегація мультиресурсів та агрегованих робіт". Так як всі алгоритми виконують оптимізацію для одного приладу, вони отримують на вхід послідовність (список) завдань, які необхідно впорядкувати таким чином, щоб мінімізувати сумарне запізнення і випередження. Кожне завдання представляє собою екземпляр класу Operation. Цей клас містить nfi поля:

– Index, порядковий номер чи ідентифікатор завдання;

- GroupIndex, номер (ідентифікатор) групи, в яку входить дане завдання;
- Time, час виконання завдання;
- DueDate, директивний строк;
- SetupTime, час налаштування.

Для всіх алгоритмів обов'язково повинні бути задані порядковий номер, час виконання завдання та директивний строк. Для задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення груп для кожного завдання повинен бути заданий номер групи. Для окремих завдань може бути заданий час налаштування.

На вхід всіх алгоритмів подається строго типізований список завдань (List<Operation>). Після розв'язання конкретної задачі відповідний модуль повертає впорядкований строго типізований список завдань згідно критерію оптимальності.

### Інформаційне забезпечення алгоритмів мінімізації випередження і запізнення

Розглянемо більш детально, яким чином реалізовано модуль розв'язання задачі МВЗ. Класи, що реалізують алгоритми розв'язання відповідних задач, зображено на діаграмі класів (рис. 7).

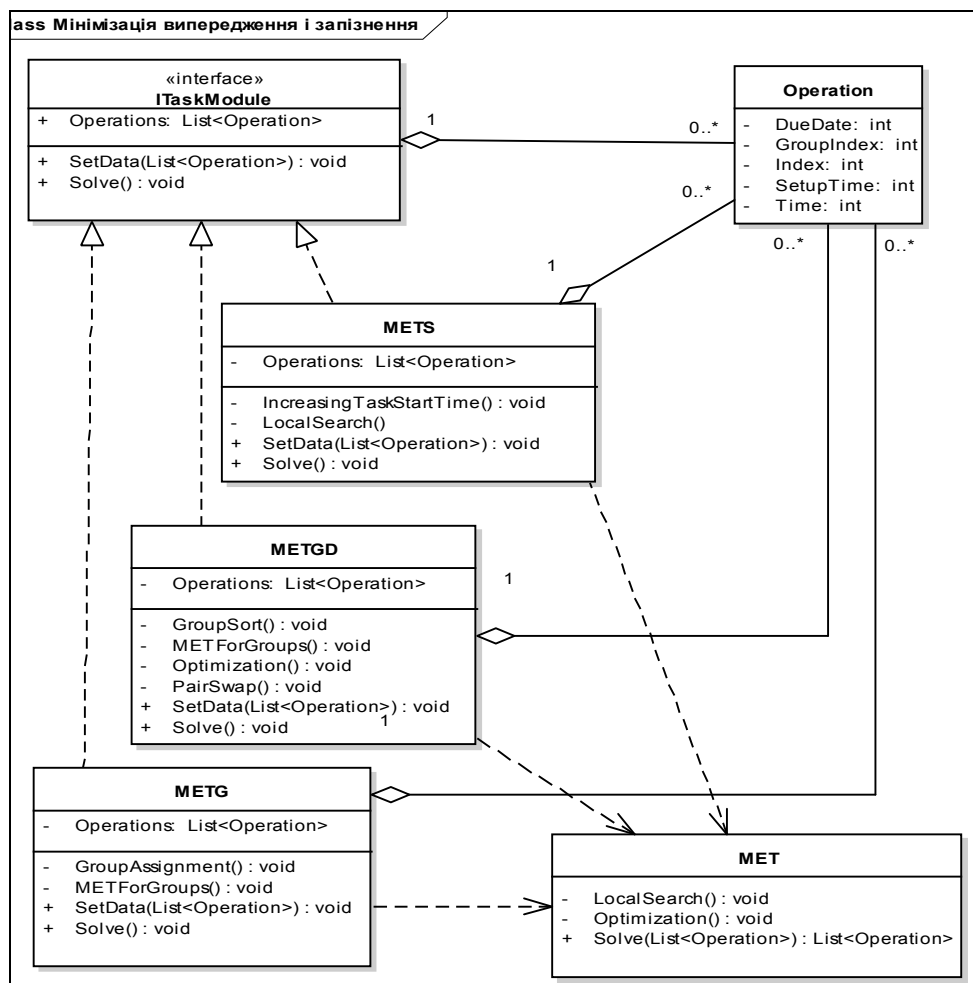


Рис. 7. Діаграма класів

Так як всі три алгоритми містять в своєму складі алгоритм мінімізації сумарного випередження і запізнення відносно директивних строків при

виконанні незалежних завдань одним приладом (МВЗ), то цей алгоритм був винесений в окремий клас MET (Minimization Earliness and Tardiness).

Спершу розглянемо принцип його роботи. Загальна схема алгоритму розв'язання задачі MB3 [6] представлена на діаграмі діяльності (рис. 8). Реалізація цього алгоритму включає наступні спеціальні методи класу (що не наслідуються від інтерфейса):

- Optimization – послідовно збільшує моменти початку виконання завдань для зменшення значення сумарного випередження і запізнення;
- LocalSearch – блок оптимізації за рахунок перестановок.

Даний алгоритм спочатку виконує мінімізацію сумарного запізнення (МСЗ), спрощена діаграма якого зображена на рис. 9. Алгоритм побудовано на перестановках і його суть полягає в оптимальному використанні завданнями, що запізнюються, резервів завдань, що не запізнюються.

На вхід даного класу поступає множина  $n$  завдань, представлена у вигляді типізованого списку. Для кожного завдання задана тривалість та директивний строк. Під час роботи алгоритму, всі операції

виконуються над послідовністю завдань  $\sigma$ , в результаті на виході алгоритму буде нова послідовність, близька до оптимальної за критерієм MB3.

Клас METS (Minimization Earliness and Tardiness with Setup costs) реалізує алгоритм мінімізації сумарного випередження і запізнення з налагодженнями (MB3Н). Алгоритм MB3Н складається із двох етапів [4]. На першому етапі налагодження не враховуються і розв'язується задача мінімізації сумарного випередження та запізнення при виконанні незалежних завдань одним приладом MB3 [6].

Далі викликається метод IncreasingTaskStartTime, що здійснює зменшення значення сумарного випередження і запізнення за допомогою послідовного збільшення моментів початку виконання завдань. Другий етап алгоритму розв'язання задачі MB3Н реалізовано у виді методу LocalSearch. Він здійснює процедуру локального пошуку кращого розв'язку задачі. Загальна діаграма діяльності даного алгоритму приведена на рис. 10.

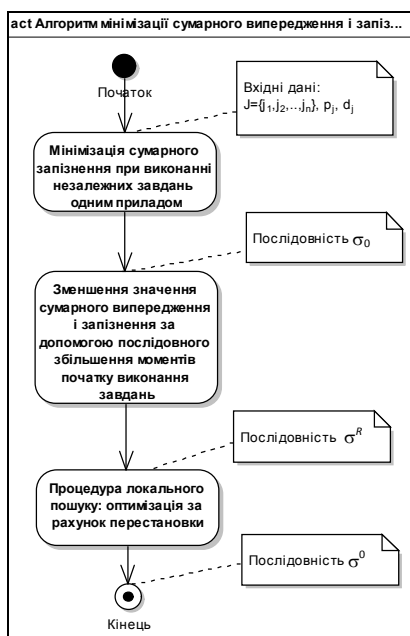


Рис. 8. Алгоритм задачі MB3

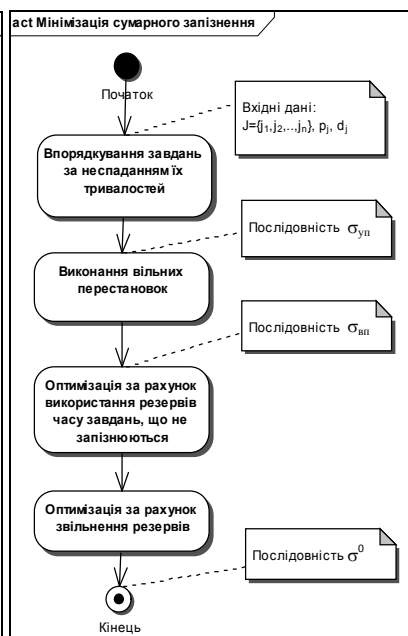


Рис. 9. Алгоритм мінімізації сумарного запізнення

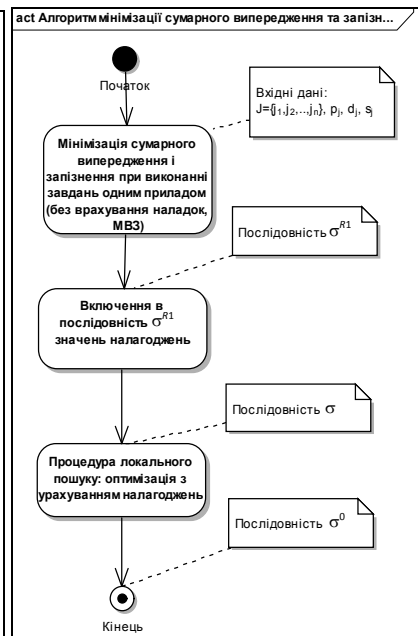


Рис. 10. Алгоритм розв'язання задачі MB3Н

Вхідні дані для алгоритму розв'язання задачі MB3Н поступають з блоку "Дезагрегація мультиресурсів та агрегованих робіт" на третьому рівні ієрархічної моделі планування. Ці дані представляють собою множину завдань  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ , для кожного з яких задані час виконання  $p_j$ , директивний строк  $d_j$  та для окремих завдань може бути заданий час налагодження  $s_{ij}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Клас METGD (Minimization Earliness and Tardiness for task Groups with Downtime) відповідає за розв'язання задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення для груп завдань (MB3Г) з дозволеними простоями приладів. Даний алгоритм використовує модифіковану реалізацію алгоритму мінімізації сумарного випередження та запізнення [6] для побудови

близької до оптимальної послідовності виконання робіт в сімействі. Детальний огляд даного алгоритму описаний в статті [5]. Спершу метод METForGroups здійснює виклик методу Solve класу MET для відповідних послідовностей. Далі виконується впорядкування сімейств завдань за не спаданням значення їх тривалостей (за це відповідає метод GroupSort).

Метод Optimization для кожного сімейства визначає інтервал вставки та здійснює призначення кожного сімейства на відповідну позицію. Потім виконується метод PairSwap, який послідовно виконує попарні перестановки сусідніх сімейств. Перестановка виконується, якщо вона призводить до зменшення значення функціоналу. Спрощену діаграму діяльності цього алгоритму можна представити на рис. 11.



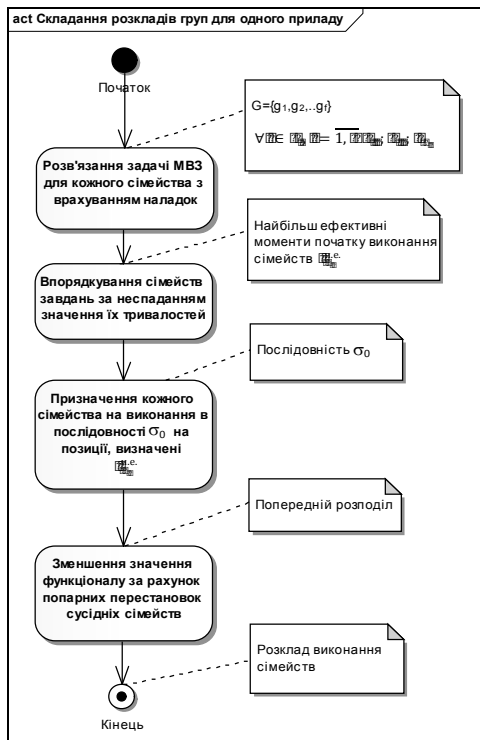


Рис. 11. Алгоритм розв'язання задачі МВЗГ з дозволеними простоями

На вхід даного алгоритму поступає множина груп завдань (сімейств)  $G$ . Для кожного завдання в групі задається інформація про час виконання, директивний строк. Для всіх груп також заданий час наладки. В результаті роботи даного алгоритму на виході буде отриманий розклад виконання сімейств.

Клас METG (Minimization Earliness and Tardiness for task Groups) відповідає задачі мінімізації сумарного випередження і запізнення для груп завдань (МВЗГ) без простоїв приладів [5]. Загальну схему роботи даного алгоритму можна зобразити на рис. 12.

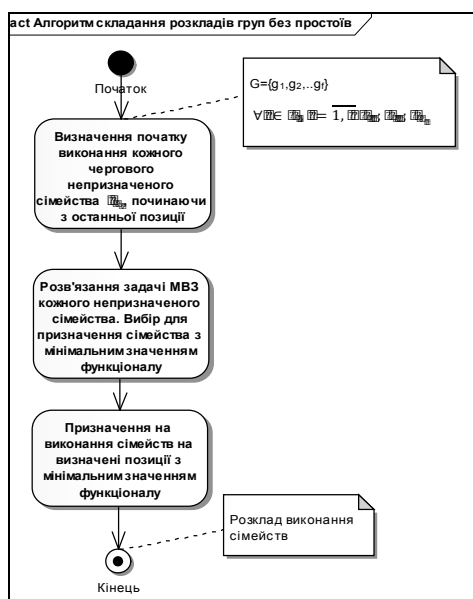


Рис. 12. Алгоритм розв'язання задачі МВЗГ із забороненими простоями приладу

Аналогічно попередньому алгоритму, спочатку визначається значення функціоналу для кожного сімейства завдань за допомогою алгоритму МВЗ (METForGroups викликає метод Solve класу MET). Після цього виконується метод GroupAssignment. Він здійснює циклічне призначення груп завдань на виконання починаючи з останньої позиції до першої. На останню позицію призначається сімейство з найменшим значенням функціоналу МВЗ. На передостанню позицію призначається сімейство з найменшим значенням функціоналу МВЗ за виключенням сімейства, що вже призначено. Ця процедура виконується доти, доки всі сімейства не будуть призначені на відповідні позиції. На вхід алгоритму МВЗГ без простоїв поступає множина груп завдань (сімейств)  $G$ . Для кожного завдання в групі задається інформація про час виконання, директивний строк. Для всіх груп також заданий час наладки. В результаті оптимізації на виході отримується розклад виконання сімейств, в якому простой приладу заборонені.

Клас Operation представляє собою одне завдання, для якого обов'язково повинні бути задані наступні атрибути: порядковий номер чи ідентифікатор завдання (Index), час виконання завдання (Time), директивний строк (DueDate). Також, в залежності від умов конкретної задачі, можуть бути задані час налаштування (SetupTime) та номер (ідентифікатор) групи, в яку входить дане завдання (GroupIndex).

### Обчислювальні результати

Для демонстрації ефективності алгоритму в інформаційній системі ієрархічного планування було проведено дослідження залежності часу розв'язування задач від факторів запізнення та діапазону директивних строків, впливу розмірності задач на середній час розв'язування для задачі МВЗН (рис. 13) і задачі МВЗГ (рис. 14, 15).

На рис. 14, 15 показано час розв'язування задачі алгоритмами A1 та A2 для задач з дозволеними простоями та забороненими простоями відповідно.

Задачі різного ступеню складності генерувалися із послідовності за допомогою двох факторів: фактору запізнення (середній коефіцієнт)  $T$  і діапазону директивних строків  $R$ .

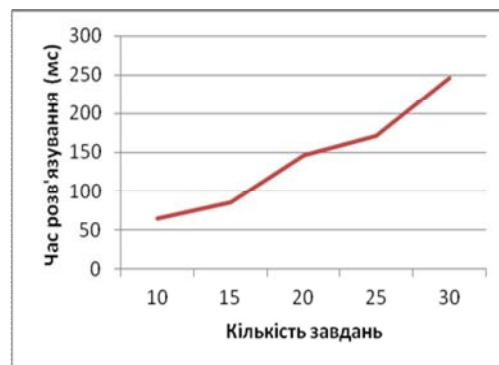


Рис. 13. Залежність часу розв'язування від кількості завдань

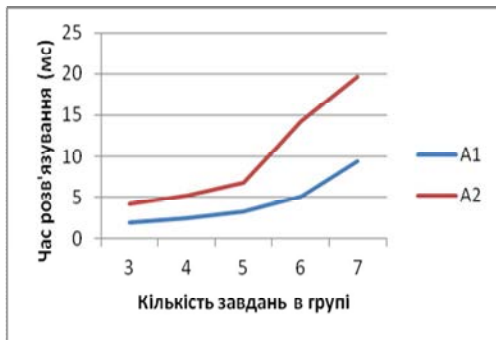


Рис. 14. Залежність часу розв'язування від кількості завдань в групі, кількість груп – 2



Рис. 15. Залежність часу розв'язування від кількості завдань в групі, кількість груп – 3

### ВИСНОВКИ

Дослідження показали, що алгоритми для задач МВЗН та МВЗГ в рамках інформаційної системи показали добрі результати. Алгоритми побудовані на базі методики розв'язання задач мінімізації виконання завдань, викладені в [6, 7]. Зведені результати по впливу розмірності (кількість завдань, а також кількість завдань в групі) на час розв'язування для задач з фактором  $T$ , рівним 0,8 та фактором  $R$ , рівним 0,8 наведені на рис. 13 – 15. Зі збільшенням проценту завдань, що потребують налагодження, загальна складність задач збільшується. З отриманих результатів можна зробити висновок, що фактори запізнення

та діапазону директивних строків значно впливають на складність задач, і при значеннях  $R = 1,0$ ;  $T = 0,6$  алгоритм МВЗН та два алгоритми МВЗГ працюють найдовше. Визначені залежності між параметрами генерованих задач та часом розв'язування допоможуть сформулювати нові обмеження і умови, які можуть прискорити роботу алгоритму.

### Список літератури

1. Baker K.R. Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review / K.R. Baker, G.D. Scudder // *Operations Research*. – 1990. – Vol. 38 (1). – P. 22-36.
2. Mazzini R. A heuristic for single machine scheduling with early and tardy costs / R. Mazzini, V.A. Armentano // *European Journal of Operational Research*. – 2001. – Vol. 128. – P. 129-146.
3. Weng M. X. A Tabu Search Approach To Solve The Early/Tardy Scheduling Problem / M.X. Weng, M.M. Sedani // *Working Paper*. – Tampa (FL): University of South Florida, 2001. – 6 p.
4. Ващук Ф.Г. Складання розкладів сумарного випередження і запізнення із налагодженнями, що залежать від послідовності / Ф.Г. Ващук, О.А. Павлов, О.Б. Мисюра, О.О. Мельник // *Вісник НТУУ "КПІ". Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. – К.: ВЕК+, 2011. – №53. – С. 192-194.
5. Ващук Ф.Г. Складання розкладів груп для одного приставу із налагодженнями за критерієм мінімізації сумарного випередження і запізнення / Ф.Г. Ващук, О.А. Павлов, О.Б. Мисюра, О.О. Мельник // *Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов. Тематический выпуск "Системный анализ, управление и информационные технологии"*. – Х.: НТУ "ХПИ", 2011. – №32. – С. 8-18.
6. Згуровский М.З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами: Монография / М.З. Згуровский, А.А. Павлов. – К.: Наукова думка, 2010. – 573 с.
7. Згуровский М.З. ПДС-алгоритмы и труднорешаемые задачи комбинаторной оптимизации / М.З. Згуровский, А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2009. – №.4. – С. 14-31.

Надійшла до редколегії 16.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Машталір, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

### ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МИНИМИЗАЦИИ СУММАРНОГО ОПЕРЕЖЕНИЯ И ЗАПАЗДЫВАНИЯ С НАЛАДКАМИ

Ф.Г. Ващук, Е.Б. Мисюра, Е.А. Мельник

Рассматривается информационное обеспечение алгоритмов решения задач составления расписаний по критерию минимизации суммарного опережения и запаздывания относительно директивных сроков: при выполнении независимых заданий одним прибором при наличии наладок зависимых от последовательности (МОЗН) и при выполнении групп (МОЗГ) одним прибором с наладками независимыми от последовательности.

**Ключевые слова:** расписание группы, критерий минимизации, информационная система, планирование.

### INFORMATIONAL SUPPORT OF ALGORITHMS OF MINIMIZING THE TOTAL EARLINESS AND TARDINESS WITH SETUPS

F.G. Vashchuk, O.B. Misura, O.O. Melnyk

Is considered informational support of algorithms of one machine scheduling problem of minimizing the total earliness and tardiness against due dates (ET): for independent tasks with setup costs and for task groups with sequence independent setup costs.

**Keywords:** curriculum of group, criterion of minimization, informative system, planning.