

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Лисецький Тарас Миколайович**



УДК 004.9:658.5:519.854

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КАЛЕНДАРНОГО ТА ОПЕРАТИВНОГО  
ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ З МЕРЕЖЕВИМ ПРЕДСТАВЛЕННЯМ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Спеціальність: 05.13.06 – Інформаційні технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації та управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч науки та техніки України  
**Павлов Олександр Анатолійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»,  
в.о. завідувача кафедри автоматизованих систем  
обробки інформації та управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч науки та техніки України  
**Міхайленко Віктор Мефодійович**  
Київський національний університет  
будівництва та архітектури,  
завідувач кафедри інформаційних технологій  
проектування та прикладної математики

доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч науки та техніки України,  
заслужений працівник освіти України  
**Годлевський Михайло Дмитрович**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
в.о. завідувача кафедри програмної інженерії та  
інформаційних технологій управління

Захист відбудеться \_\_\_\_\_ 2021 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.29 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.Київ-56, просп. Перемоги 37, корпус № \_\_\_, аудиторія № \_\_\_.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий \_\_\_\_\_ 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. Ф. Теленик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Методи календарного та оперативного планування (КОП) є алгоритмічною основою сучасних інформаційних технологій (ІТ), що розв'язують задачі управління для різних об'єктів з мережевим представленням технологічних процесів (МПП). Системи КОП знаходять впровадження в самих різних областях народного господарства, як у виробничих, так і у сфері послуг, зокрема, у системах управління проектами. До об'єктів з МПП відносяться 70–80 % від усіх виробництв, у тому числі виробництва дискретного типу з усіх галузей економіки та виробництва подвійного призначення. Останнє говорить про актуальність створення методів та систем КОП в сучасній економічній та політичній ситуації в Україні та світі.

Ефективність функціонування будь-яких систем планування визначається ефективністю методів КОП, покладених в їх основу. Ефективні системи КОП в сучасних жорстких умовах ринкової економіки повинні засновуватись на нових моделях, ефективних методах КОП і їх реалізації з використанням сучасних ІТ. Зокрема, застосовувані методи КОП мають дозволяти оптимально або дуже близько до оптимуму розв'язувати задачі реальної практичної розмірності. Більшість одноетапних задач календарного планування є важкорозв'язуваними задачами комбінаторної оптимізації (ВЗКО), найчастіше — *NP*-трудними, їх точне розв'язання пов'язане з експоненціальною трудомісткістю, що дозволяє отримувати точний розв'язок тільки для задач невеликої розмірності (декілька сотень робіт). Пошук для них точних алгоритмів розв'язання, час роботи яких обмежений поліномом від розмірності задачі, в даний час є безперспективним. Навіть найкращі алгоритми переборного типу як вітчизняних, так й іноземних вчених (В.С. Міхалевич, І.В. Сергієнко, М.З. Шор, В.С. Танаєв, В.В. Шкурба, Ж.К. Ленстра, Р.Л. Грем, А.Е. Рінной Кен, С.Танака, Е.Л. Лоулер, К.Р. Бейкер та ін.), засновані на методах гілок і меж, динамічного програмування і т. п., мають експоненціальну трудомісткість і вимагають значних обчислювальних витрат навіть при розв'язанні прикладів середньої розмірності, що робить неможливим розв'язання реальних практичних задач.

Ще більш складними для розв'язання є багатоетапні задачі календарного планування (БЗКП), але ці моделі є більш адекватними моделями реальних об'єктів з МПП. БЗКП включає мережеву технологію, адекватну реальному об'єкту, та має на меті побудову поопераційного плану виконання робіт з оптимізацією за глобальним критерієм. Враховуючи те, що БЗКП може для кожного вузла мережі чи етапу оптимізації розв'язувати окремі одноетапні ВЗКО, то не існує навіть ефективних наближених чи евристичних алгоритмів розв'язання БЗКП із забезпеченням досягнення глобального оптимуму.

Ефективною спробою розв'язання БЗКП із метою пошуку розв'язку в області глобального екстремуму була створена проф. О.А. Павловим та його учнями трьохрівнева модель планування (ТМП), алгоритми побудови якої використовували методологію агрегації задачі, оптимізацію агрегованої моделі з використанням теорії ПДС-алгоритмів та наступної дезагрегації отриманого розв'язку.

Нажаль, в ТМП рівень побудови поопераційного плану фактично не був формалізований. Малося на увазі, що ця задача очевидним образом евристично розв'язується за результатами узгодженого планування на агрегованому рівні. Також в

ній не було належним чином конструктивно формалізовано поопераційне мережеве представлення реальних дискретних технологічних процесів (вона була представлена якісно в загальному вигляді). А відсутність ефективного алгоритму отримання поопераційного плану не дозволила розв'язати також задачу оперативного планування (оперативного корегування плану у випадку часткового збою при його виконанні). Водночас, задача оперативного корегування є дуже актуальною, так як дрібні та великі збої за часом виконання операцій або за поставкою необхідних деталей існують навіть в роботизованих виробництвах, що пов'язано як з людським фактором, так і з поломкою техніки. Тому система планування не може представляти комплексний підхід до вирішення проблеми, якщо вона не має складової оперативного планування.

Цю проблему пропонується вирішити на основі реалізації наступних задач:

- формалізації мережевого представлення дискретних технологічних процесів;
- модифікації та адаптації на основі цієї формальної мережевої моделі: процедур агрегації та дезагрегації мережевої моделі та узгодженого планування ТМП, обґрунтування зведення задачі планування до апроксимуючої задачі МЗМ;
- формалізації рівня операційного планування, що дозволить розробити, на відміну від ТМП, процедуру отримання поопераційного плану;
- останнє дозволить створити також алгоритмічне забезпечення оперативного планування.

Таким чином, проблема вирішується за допомогою розширення ТМП і створення чотирьохрівневої моделі календарного й оперативного планування та прийняття рішень (ЧМ КОП), в якій формалізовано процедури отримання поопераційного плану (третій рівень ЧМ КОП) і його оперативного корегування (четвертий рівень ЧМ КОП). Автор приймав участь у створенні ЧМ КОП на паритетних началах [5–7, 9–12].

ЧМ КОП включає ряд одноетапних ВЗКО, від ефективності розв'язання яких залежить ефективність всієї процедури планування. Для їх розв'язання застосовуються ПДС-алгоритми. Створена проф. О. А. Павловим та його учнями теорія ПДС-алгоритмів є альтернативним напрямом, який дозволяє точно і ефективно розв'язувати *NP*-трудні задачі та інші ВЗКО в загальній постановці в кілька разів більшої розмірності, ніж інші існуючі методи (а також дозволяє розпаралелювання обчислень), а при невиконанні достатніх ознак оптимальності отримувати ефективний точний розв'язок експоненціальним підалгоритмом або евристичний чи наближений розв'язок з оцінкою відхилення від оптимуму для індивідуальних практичних задач великої розмірності (до десятків тисяч робіт). Таким чином, ПДС-алгоритми дозволяють отримувати точні або наближені розв'язки реальних практичних задач для своєчасного задоволення потреб ринку та максимізації прибутку підприємств.

Роботу спрямовано на вирішення важливої проблеми ефективного розв'язання БЗКП та ВЗКО, актуальних проблем планування в соціально-економічних системах з МПТПу різних прикладних областях. Таким чином, виконання роботи є актуальним. Отримані наукові результати будуть ефективним вкладом в розвиток теорії розв'язання комбінаторних задач та БЗКП, що є основою створення систем КОП в сучасних ринкових умовах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Роботу виконано на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації та управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у рамках наступних НДР і НДДКР: «Створення математичних моделей та методів ієрархічного планування та прийняття рішень в виробничих системах з обмеженими ресурсами» (2008–2010, номер державної реєстрації 0108U001346); «Математичні моделі і методи планування та прийняття рішень в складних системах в умовах невизначеності» (2011–2013, номер державної реєстрації 0111U000740); «Теорія ПДС-алгоритмів і створення на її основі моделей і методів планування, прийняття рішень» (2014–2016, номер державної реєстрації 0114U003432); «Важкорозв'язувані задачі комбінаторної оптимізації та теорія ПДС-алгоритмів» (2017–2019, номер державної реєстрації 0117U000460).

**Мета і задачі дослідження.** *Метою роботи* є створення інформаційної технології календарного та оперативного планування по одному з низки запропонованих практичних критеріїв в системах з мережевим представленням технологічних процесів на основі використання методології системного аналізу, методів агрегації та дезагрегації, високоефективних алгоритмів для одноетапних та багатоетапних задач календарного планування, що веде до суттєвого підвищення ефективності отримання поопераційного плану в об'єктах з дискретним представленням технологічних процесів, зокрема в дрібносерійних виробництвах загального типу. *Основні завдання*, що забезпечують досягнення мети роботи:

- 1) критичний огляд систем, моделей, методів та інформаційних технологій КОП;
- 2) розробка алгоритмічного забезпечення ЧМ КОП у системах з МПТП на основі формалізації поопераційного мережевого представлення дискретних технологічних процесів, модифікації та розширення процедур ТМП, розробки алгоритмів поопераційного та оперативного планування;
- 3) дослідження ефективності алгоритму розв'язання одноетапної задачі календарного планування першого рівня ЧМ КОП «Мінімізація сумарного зваженого моменту закінчення виконання завдань при відношенні порядку, заданому орієнтованим ациклічним графом» для випадку, коли ваги завдань задані тільки для кінцевих вершин графа (МЗМН), яка є найбільш агрегованою моделлю соціально-економічних систем з МПТП;
- 4) розв'язання задачі четвертого рівня ЧМ КОП «Складання розкладу виконання незалежних завдань ідентичними паралельними пристроями, моменти запуску яких менше спільного директивного строку» (МСЗПР);
- 5) узагальнення задачі МСЗПР на випадок, коли частина робіт не може порушувати спільний директивний строк, та розробка наближеного алгоритму розв'язання узагальненої задачі;
- 6) обґрунтування ефективності методу розв'язання БЗКП за допомогою розв'язання задачі МЗМН;
- 7) розробка ІТ КОП для систем, що мають МПТП.

*Об'єктом дослідження* є процес планування у соціально-економічних системах з МПТП.

*Предмет дослідження* — моделі, методи та інформаційні технології ієрархічного планування, алгоритми розв'язання одноетапних задач календарного планування у соціально-економічних системах з МПТП.

*Методи досліджень* — методи системного аналізу, теорія ПДС-алгоритмів, дослідження операцій, статистичні методи моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- 1) вперше запропоновані формальні моделі поопераційного мережевого представлення дискретних технологічних процесів, які, на відміну від існуючих, дозволяють багатоетапну задачу календарного планування звести до знаходження допустимого розв'язку з заданими директивними строками, що залежить від вибраного критерія;
- 2) вперше розроблена методологія побудови чотирьохрівневої моделі календарного та оперативного планування на основі системного аналізу, теорії ПДС-алгоритмів, методології агрегації та дезагрегації запропонованої мережевої моделі та узгодженого планування, що дозволило знаходити поопераційний план в області глобального екстремуму по вибраному критерію оптимізації;
- 3) підтверджена ефективність використання точних ПДС-алгоритмів в запропонованій чотирьохрівневій моделі планування, статистично підтверджена обчислювальна ефективність ПДС-алгоритма для задачі МЗМ, розроблений новий ефективний ПДС-алгоритм для задачі МСЗПР, для узагальненої задачі МСЗПР запропонований новий ефективний наближений алгоритм з теоретично обґрунтованими властивостями, запропонований ефективний алгоритм знаходження допустимого розв'язку багатоетапної задачі календарного планування з директивними строками, що залежать від вибраного критерія оптимізації;
- 4) на основі запропонованих моделей та методів розроблена оригінальна інформаційна технологія календарного та оперативного планування в системах з мережевим представленням технологічних процесів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати досліджень, зокрема, ЧМ КОП, були використані в НДР, виконаних на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації і управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». На основі ЧМ КОП створена ІТ КОП у системах, що мають МПТП, яка реалізована у вигляді універсальної ієрархічної системи КОП виробництв дрібносерійного типу (УІС КОП). Система використовується для автоматизації процесу планування виробництва на підприємстві ФГ «ЛІТА» (м. Мукачеве). Вона може розв'язувати задачі реальної практичної розмірності — сотні тисяч робіт та тисячі пристроїв, що їх виконують.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, що виносяться до захисту, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються даного дослідження, здобувачу належать: методологія побудови ЧМ КОП [6, 7, 11]; формальна модель технологічного процесу [6, 7, 11]; програмне забезпечення розв'язання задачі МЗМН [2]; метод побудови поопераційного плану (третій рівень ЧМ КОП) [6, 10]; метод оперативного

коректування поопераційного плану (четвертий рівень ЧМ КОП) [7, 11]; модифіковані методи агрегації/деагрегації мережевої моделі та узгодженого планування (адаптація методів з ТМП), модифіковане обґрунтування зведення задачі планування до апроксимуючої задачі МЗМ [5, 6, 9, 12]; алгоритм визначення претендентів для об'єднання у «спільні вершини» для ТМП [3, 9]; статистичні дослідження універсального методу КОП, експериментальні дослідження алгоритму розв'язання задачі МСЗПР, узагальнення задачі МСЗПР, алгоритм розв'язання та теоретичне дослідження узагальненої задачі [1].

Автор самостійно розробив інформаційну технологію універсальної ієрархічної системи КОП виробництв дрібносерійного типу [13], яка реалізує алгоритмічне забезпечення ЧМ КОП.

Автор експериментально дослідив розв'язання задачі МЗМН, яка застосовується в ЧМ КОП, та довів залежність ефективності розв'язання задачі БЗКП на третьому рівні ЧМ КОП від ефективності розв'язання задачі МЗМН [8].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались на наукових конференціях «Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у XXI столітті» (2012), «Автоматика-2014», «Infocom Advanced Solutions 2015», «Інтелектуальний потенціал — фундамент майбутнього України та її Збройних Сил» (2016), «SAIT 2017», а також на наукових семінарах в КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, в тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях України (з них 1 стаття у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР, та індексуються WoS); 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основного змісту, висновків, списку літератури та 8 додатків. Загальний обсяг роботи складає 282 сторінки, включаючи 137 сторінок основного тексту. Дисертаційна робота містить 72 рисунки, 46 таблиць, список використаних джерел зі 186 найменувань на 21 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** описуються системи, що мають МПТП. Наводяться вимоги, яким повинна задовольняти ефективна система КОП. Аналізуються сучасні моделі, методи та системи КОП. Відповідно до постановки задачі — побудова поопераційного плану, що реалізує потенційний портфель замовлень і є оптимальним за критерієм, заданим замовниками, — робиться висновок про те, що безпосереднє розв'язання «у польоті» такої складної задачі — багатоетапної задачі календарного планування (БЗКП) — є неефективним. Для її розв'язання раніше була запропонована трьохрівнева модель планування (ТМП) — ієрархічна система взаємозалежних агрегованих моделей календарного планування і прийняття рішень (об'єднання в рамках єдиного цілого формальних моделей і методів з експертними

рішеннями), що суттєво спростило одержання ефективного розв'язку. Принциповим недоліком ТМП є відсутність можливості побудови поопераційного плану, що однозначно відповідає процесу поопераційного планування дискретного виробництва. Це пов'язано з тим, що в трьохрівневій моделі відсутня формалізація мережевого представлення дискретних технологічних процесів. Формалізація мережевої моделі дискретних виробництв і на її основі розробка ефективних взаємозв'язаних моделей на основі агрегації та дезагрегації, ефективних ПДС-алгоритмів дозволяють створити ефективний евристичний алгоритм для розв'язання БЗКП, при чому виконання умов агрегації дозволяє отримати розв'язок в околі глобального оптимуму. Цей алгоритм використовує низку практичних критеріїв. Це і є основним змістом дисертаційної роботи.

Показано, що ефективне КОП в сучасних ринкових умовах вимагає розробки нової ієрархічної моделі КОП та ІТ планування для соціально-економічних систем, що мають МПТП.

У *другому розділі* описано алгоритмічне забезпечення ЧМ КОП для складних систем, що мають МПТП.

*Опис моделі.* ЧМ КОП складається з чотирьох рівнів (прогнозного, погодженого, точного та оперативного планування) та окремого блоку прийняття рішень (БПР) (рис. 1). Створення ЧМ КОП досягнуто шляхом послідовного вирішення наступних завдань:

1) формалізовано МПТП; розроблено спеціальну мову формалізації мережевого представлення технологічних процесів. Базові елементи, на основі яких синтезується вхідна мережева модель, що задає поопераційну технологію виконання заданого портфеля замовлень, такі.

*Елемент типу 1* — виконання однієї роботи одним пристроєм. Задано момент готовності виконання роботи на пристрої  $r$ , директивний строк  $d$  її виконання. У допустимому розкладі момент закінчення виконання  $C \leq d$ .

*Елемент типу 2* — один пристрій послідовно без переривань виконує  $k$  робіт. Задано моменти готовності виконання робіт на пристрої  $r_i$ , директивні строки  $d_i$  виконання  $i$ -ї роботи на пристрої. У допустимому розкладі  $C_i \leq d_i$ .

*Елемент типу 3* —  $t$  незалежних (ідентичних) паралельних пристроїв без переривань виконують  $k$  робіт, які повинні бути виконані до спільного директивного строку  $d$ . У допустимому розкладі  $C_i \leq d$ ,  $i = \overline{1, k}$ . Моменти запуску пристроїв повинні бути однакові. Роботи, що слідує за елементом типу 3, можуть починатися тільки після закінчення всіх робіт на даному елементі.

*Елемент типу 4* —  $t$  незалежних (ідентичних) паралельних пристроїв *рівної* продуктивності, що працюють без переривань, виконують  $k$  робіт, які повинні бути виконані до різних директивних строків  $d_i$ .  $d_i^* = [d_i - \Delta_i, d_i]$ ,  $\Delta_i > 0$ ,  $i = \overline{1, k}$ , визначає діапазон одержання допустимого розв'язку:  $C_i \leq d_i$  або  $C_i \in d_i^*$ . Моменти запуску пристроїв можуть бути різними.

*Елемент типу 5* —  $t$  незалежних паралельних пристроїв *різної* продуктивності, що працюють без переривань, виконують  $k$  робіт, які повинні бути виконані до різних директивних строків  $d_i$ .  $d_i^* = [d_i - \Delta_i, d_i]$ ,  $\Delta_i > 0$ ,  $i = \overline{1, k}$ , визначає діапазон одержання допустимого розв'язку:  $C_i \leq d_i$  або  $C_i \in d_i^*$ . Моменти запуску пристроїв можуть бути різними.

Елемент типу накопичувач відображає появу нової множини, що складається з  $q$  невиконаних робіт ( $q \geq 1$ ) у результаті закінчення виконання попередньої множини з  $p$  робіт ( $p \geq 1$ ). Накопичувач описує відносини передування між роботами, але не є об'єднанням робіт якогось роду. Він може, зокрема, описувати складання однієї роботи з декількох інших і развузлівку однієї роботи на декілька інших. Елемент типу накопичувач завжди повинен стояти після елемента типу 3 відповідно до умов його роботи. Мережева модель точно відображає реальний технологічний процес. При цьому номери робіт, що відповідають індексам  $i$  їх параметрів  $l_i$ ,  $d_i$ ,  $r_i$  і т.д., для кожного елемента свої та визначаються технологією виконання робіт.

2) визначено множину критеріїв оптимальності поопераційного плану (5 базових критеріїв і всі можливі їх лінійні комбінації).

*Постановка задачі:* побудова технологічної мережі, що задає технологію виконання множини комплексів взаємозв'язаних робіт (виробів)  $J$  (завдання технології гарантує адекватність технологічної мережі реальному технологічному процесу). Завдання одного з 31 критеріїв оптимальності, завдання мінімального очікуваного прибутку підприємства. По кожній роботі  $i$  задається питома тривалість виконання  $l_i$  для одного виробу, а моменти початку  $r_i$  і закінчення  $S_i$  виконання роботи  $i$  будуть розраховані при розв'язанні задачі. По кожному виробу  $i$  задаються число виробів у портфелі замовлень  $N_i$ , вага  $\omega_i$ , директивний строк  $d_i$  і діапазон одержання допустимого розв'язку  $\Delta_i$  (для тих виробів, у технології виконання яких



Рисунок 1 – Схема алгоритмічного забезпечення ЧМ КОП

зустрічаються елементи типу 4 і 5), момент закінчення виконання  $C_i$  виробу  $i$  буде розрахований при розв'язанні задачі. Для кожного ресурсу вказується тип елемента і число паралельних пристроїв, для елемента типу 5 задаються продуктивності пристроїв  $s_i$  (тривалість роботи  $l_i$  задається для пристрою з одиничною продуктивністю).

При плануванні за базовим критерієм оптимальності мережа має властивості, описані вище, з наступним обмеженням: усередині мережі можуть перебувати декілька віртуальних пристроїв, що відповідають одному і тому же фізичному пристрою (що позначається однаковим номером елементів), тільки в тому випадку, якщо вони рознесені у часі технологією (щоб виключити можливість виконання різних робіт у один і той же інтервал часу на одному і тому же фізичному пристрої). Для цього, наприклад, можна використовувати накопичувач між елементами, що відповідають одному і тому ж фізичному пристрою, для поділу множин робіт, що виконуються на них. При дотриманні цього обмеження є можливість для БЗКП використовувати ефективні методи розв'язання, засновані на одержанні розв'язку безпосередньо від кінцевих робіт до початкових, з використанням математично строгих розв'язків одноетапних задач календарного планування, у той час як для довільної віртуальної мережі задача розв'язується за допомогою евристичних методів, з меншою гарантією оптимальності властивостей розв'язку.

Були приведені додаткові обмеження, що накладаються на мережу при плануванні за синтетичними критеріями оптимальності, кожен з яких є відповідною лінійною згортою базових критеріїв.

Базові критерії оптимальності такі.

*Критерій 1* Максимізація сумарного прибутку системи планування у випадку відсутності директивних строків. Прибуток від реалізації  $i$ -го виробу ( $i$ -ї серії виробів) є функцією часу та дорівнює  $P_i(t) = \omega_i(T) \cdot (T - C_i)$ , де  $\omega_i(T)$  — ваговий коефіцієнт  $i$ -го виробу ( $i$ -ї серії виробів), визначений експертним шляхом;  $T$  — плановий період;  $C_i \leq T$  — момент закінчення виконання  $i$ -го виробу ( $i$ -ї серії виробів), відповідний до моменту закінчення виконання його кінцевої вершини. Критерій максимізації сумарного прибутку системи планування в цьому випадку визначається виразом

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum_{i=1}^n P_i(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(T) \cdot (T - C_i) + P - Z = \\ &= T \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i(T) - \sum_{i=1}^n \omega_i(T) \cdot C_i + P - Z \rightarrow \max, \end{aligned}$$

де  $P$  — гарантований мінімальний дохід від продажу (виконання) усіх  $n$  виробів (серій виробів);  $Z$  — усі витрати. Функція, що оптимізується, має вигляд

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i(T) \cdot (T - C_i) \right\} + P - Z$$

або

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i(T) \cdot C_i. \quad (1)$$

Критерій (1) еквівалентний критерію мінімізації сумарного зваженого моменту закінчення виконання виробів (МЗМ) при відношенні порядку, заданому орієнтованим ациклічним графом, побудованим на критичних шляхах виробів.

*Критерій 2* Максимізація сумарного прибутку системи планування за умови: для всіх виробів  $i \in I$  введені директивні строки  $d_i$ , які не можуть бути порушені (планування «точно в строк»):

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i U_i \right\} - 3, \text{ де } U_i = \begin{cases} 1, \mathbf{C}_i = d_i \\ 0, \mathbf{C}_i \neq d_i \end{cases}$$

де  $\omega_i$  — прибуток від виконання  $i$ -го виробу, якщо він виконаний точно в строк;  $3$  — усі витрати. Таким чином, *критерій 2* має вигляд:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i U_i \right\}.$$

*Критерій 3* Максимізація сумарного прибутку системи планування за умови: для всіх виробів  $i \in I$  уведено директивні строки  $d_i$ , необхідно мінімізувати сумарне зважене запізнення виконання виробів відносно директивних строків:

$$\max \left\{ P - \sum_{i=1}^n \omega_i \max(0, \mathbf{C}_i - d_i) \right\} - 3,$$

де  $P$  — гарантований мінімальний дохід від продажу (виконання) усіх  $n$  виробів, якщо всі вони виконані без запізнення;  $3$  — усі витрати,  $\omega_i$  — штраф за запізнення закінчення виконання  $i$ -го виробу відносно директивного строку на одиницю часу. Таким чином, *критерій 3* має вигляд

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i \max(0, \mathbf{C}_i - d_i) \right\}.$$

Величина  $\omega_i \max(0, \mathbf{C}_i - d_i)$  — це зменшення доходу  $P$  у випадку виконання виробу  $i$  із запізненням  $\mathbf{C}_i - d_i$ . Рішення по виконанню або відмові від виконання таких виробів ухвалюється в БПР.

*Критерій 4* Для всіх виробів  $i \in I$  уведено директивні строки  $d_i$ . Для кожного виробу зазначена величина  $\omega_i$  — абсолютний прибуток від виконання виробу, що не залежить від моменту закінчення виконання виробу в тому випадку, якщо виріб виконується без запізнення відносно директивного строку, інакше прибуток системи планування по цьому виробу дорівнює нулю. Задача — максимізувати сумарний прибуток системи планування:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i U_i \right\} - 3, \text{ де } U_i = \begin{cases} 1, \mathbf{C}_i \leq d_i \\ 0, \mathbf{C}_i > d_i \end{cases}$$

де  $\omega_i$  — прибуток від виконання  $i$ -го виробу, якщо він виконаний без запізнення відносно директивного строку;  $3$  — ризик зменшення прибутку через зрив виконання виробу в строк. Таким чином, *критерій 4* має вигляд

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i U_i \right\}.$$

*Критерій 5* Для всіх виробів задані директивні строки  $d_i$ . Необхідно мінімізувати сумарний штраф системи планування як за випередження, так і за запізнення відносно директивних строків:

$$\max \left\{ P - \sum_{i=1}^n \omega_i |C_i - d_i| \right\} - 3,$$

де  $P$  — гарантований мінімальний дохід від продажу (виконання) усіх  $n$  виробів (виробів), якщо всі вони виконані без випередження і запізнення;  $3$  — усі витрати;  $\omega_i$  — штраф за відхилення моменту закінчення виконання  $i$ -го виробу від директивного строку на одиницю часу. Таким чином, *критерій 5* має вигляд

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i |C_i - d_i|.$$

Величина  $\omega_i |C_i - d_i|$  — це зменшення доходу  $P$  у випадку виконання виробу  $i$  із запізненням  $C_i - d_i$ . Рішення по виконанню або відмові від виконання цих виробів ухвалюється в БПР.

*Синтетичні критерії 6–31* — це лінійна згортка всіх можливих комбінацій п'яти базових критеріїв.

На етапі планування директивні строки можуть бути порушені (коефіцієнти  $\omega_i$  у базових критеріях 3, 5 визначають зменшення розрахункового прибутку, а в базових критеріях 2, 4 — штрафи за невиконання директивних строків).

3) на основі формалізації МПТП модифіковані:

- загальні процедури виконання його дворівневої агрегації із ТМП: перетворення робіт в агреговані одиниці (перший рівень агрегації) і об'єднання критичних шляхів виробів на спільних вершинах графа зв'язності з представленням сукупності ресурсів у вигляді одного пристрою (другий рівень агрегації);
- обґрунтування зведення задачі планування до апроксимуючої задачі МЗМ для другого рівня агрегації;
- процедура узгодженого планування, виконувана на агрегованій мережі першого рівня агрегації, в якій розв'язок, отриманий на другому рівні агрегації, задає порядок виконання виробів (груп виробів), що відповідає одному базовому критерію.

*Постановка задачі узгодженого планування за базовим критерієм:* на мережі першого рівня агрегації побудувати розклад (узгоджений план) виконання агрегованих робіт агрегованими елементами, що мінімізує сумарну тривалість проходження робіт (еквівалентно мінімізації простоїв устаткування) при обмеженні: порядок призначення виробів визначається пріоритетно-упорядкованою послідовністю, отриманою в результаті розв'язання задачі МЗМ (інформація передається із блоку 2).

Узгоджене планування за базовим критерієм виконується відповідно до послідовності агрегованих робіт, отриманої в результаті розв'язання апроксимуючої задачі МЗМ. Така черговість призначень робіт на виконання максимізує відповідну складову синтетичного функціонала з точністю до адекватності його значення функціоналу апроксимуючої задачі МЗМ.

*Постановка задачі узгодженого планування за синтетичним критерієм:* є  $N$  підмереж першого рівня агрегації, підмережі зв'язані спільним устаткуванням (віртуальне устаткування, що відповідає одному і тому же фізичному встаткуванню), що не дозволяє будувати розклади для підмереж незалежно один від

одного. Кожній підмережі відповідає свій базовий критерій оптимальності. На сукупності  $N$  підмереж потрібно побудувати розклад (узгоджений план) виконання агрегованих робіт агрегованими елементами, що мінімізує сумарну тривалість проходження робіт (еквівалентно мінімізації простоїв устаткування) при обмеженнях: призначення агрегованих робіт здійснюється групами; групи робіт відповідають підмережам агрегованої мережі (інформація передається із блоку 2), а в рамках кожної групи виробів порядок визначається пріоритетно-упорядкованою послідовністю, отриманою в результаті розв'язання апроксимуючої задачі МЗМ, відповідної до цієї групи (при цьому ваги виробів задаються замовником заздалегідь відповідно до критерію оптимізації для кожної групи виробів). Простої устаткування, що залишилися після призначення всіх робіт попередніх груп виробів (відповідно до черговості їх призначення на виконання) використовуються для призначення робіт з наступної групи виробів, що розподіляється (відповідно до черговості їх призначення в цій групі), тільки в тому випадку, якщо це не приводить до значних витрат на зберігання незавершеної продукції та до значного відхилення тривалості виготовлення виробів від їхніх критичних шляхів.

Узгоджене планування за синтетичним критерієм реалізується послідовним призначенням на виконання груп виробів (кожна з яких визначається відповідною складовою синтетичного функціонала), розглядаються всі можливі комбінації черговості призначення груп виробів. У кожній групі виробів черговість призначення виробів на виконання максимізує відповідну складову синтетичного функціонала з точністю до адекватності його значення функціоналу апроксимуючої задачі МЗМ. Ця евристика дозволила вхідну задачу планування за 31 критерієм звести до розв'язання однієї БЗКП (кожному з розв'язків за 31 критерієм відповідають свої директивні строки виконання кінцевих робіт). Евристика ефективна, якщо вона адекватна реальному технологічному процесу.

4) формалізовано процес побудови поопераційного плану (третій рівень ЧМ КОП) за результатами узгодженого планування (другий рівень ЧМ КОП): якщо критерій оптимальності є базовим, то задача поопераційного планування формулюється і розв'язується як БЗКП (моменти завершення виконання виробів (груп виробів) є директивними строками в БЗКП), ефективний метод її розв'язання використовує ПДС-алгоритми для одноетапних задач календарного планування; для синтетичного критерію оптимальності (лінійної комбінації базових критеріїв) запропоновано альтернативні методи побудови поопераційного плану, один з яких є оригінальним модифікованим методом узгодженого планування.

5) розроблено два алгоритми корегування поопераційного плану (четвертий рівень ЧМ КОП — оперативне планування). Перший алгоритм є модифікацією алгоритмічної процедури планування на 1–3 рівнях моделі. Задача розв'язується за одним з чотирьох базових критеріїв або їх лінійною комбінацією. Необхідно відзначити, що вагові коефіцієнти базових критеріїв оптимальності для задачі оперативного планування задаються замовником повторно (необхідно розрізнити задачу побудови поопераційного плану, що реалізує потенційний портфель замовлень, — строки виконання виробів (груп виробів) можуть коригуватися на етапі узгодження з відповідним критерієм оптимальності корегуванням прибутку, — і завдання вагових коефіцієнтів штрафів за запізнення виконання виробів (груп виробів) відносно

директивних строків за тим самим затвердженим поопераційним планом). Другий алгоритм оперативного планування містить у рамках єдиного цілого формальний алгоритм і експертне планування і, в разі можливості його реалізації, ефективно (з точки зору критерію оптимізації) розв'язує задачу оперативного корегування календарного поопераційного плану, отриманого на третьому рівні планування. Формальний алгоритм включає в себе ПДС-алгоритми для ВЗКО.

б) обґрунтована процедура експертного оцінювання і корегування особою, яка приймає рішення, як потенційних портфелів замовлень, так і директивних строків виконання виробів (груп виробів), що входять до них; затвердження результуючого поопераційного плану на основі аналізу планів, одержаних формальними методами.

Роботу алгоритмів усіх чотирьох рівнів ЧМ КОП опрацьовано на прикладі, що наведений у додатку Б. Також створена модель є базою для програмного забезпечення універсальної ієрархічної системи КОП виробництва дрібносерійного типу (розділ 4).

У *третьому розділі* досліджується ефективність ЧМ КОП. Обґрунтовується можливість застосування моделі для будь-якого виду виробництва за одним з даних п'яти критеріїв оптимальності. Показано, що для будь-якого виду виробництва, при будь-якій вихідній технології виконання виробів і при будь-якій реалізації БЗКП, розв'язання задачі планування за одним з цих п'яти критеріїв оптимальності зводиться до отримання допустимого розв'язку БЗКП за критерієм максимізації моменту запуску найбільш ранньої роботи.

Метод розв'язання полягає в наступному. Пропонований метод розв'язання задачі реалізується для випадку, коли для всіх кінцевих робіт мережі задаються директивні строки і припустимо виконання кінцевої роботи до її директивного строку.

*Визначення 1 Допустимим* є розклад, у якому моменти закінчення виконання всіх кінцевих робіт не перевищують їхніх директивних строків.

Для мережевої багатоетапної задачі календарного планування, побудованої для базового критерію оптимальності, сформулюємо умови оптимальності допустимого розв'язку.

*Визначення 2 Розклад* є *оптимальним*, якщо він відповідає наступним умовам:

а) розклад допустимий;

б) з усіх допустимих розкладів оптимальним може бути тільки той, у якому досягається мінімум сумарного випередження відносно кінцевих директивних строків;

в) 1) оптимальним є допустимий розклад, що задовольняє пунктам а) і б), у якому на множині початкових робіт досягається максимум:

$$\max \left( \min_j r_{1j} \right), j = \overline{1, p},$$

де  $r_{1j} \geq 0$  — моменти запуску початкових робіт мережі (перших робіт на елементах  $1j$ ), а  $p$  — число таких елементів;

2) оптимальним є допустимий розклад, що задовольняє пунктам а) і б), у якому на множині початкових робіт досягається максимум:

$$\max\left(\min_j r_{1j}\right) = r_{1j_1}, j = \overline{1, p}$$

$$\max\left(\min_j r_{1j}\right) = r_{1j_l}, j = \overline{1, p}, l = \overline{2, p}, j \neq j_k, k = \overline{1, l-1}.$$

1 У силу властивостей технологічної мережі, що відповідає моделі планування за одним з базових критеріїв, однозначно директивні строки кінцевих робіт, де необхідно, перераховуються в директивний строк виконання робіт елементів типу 2–5 останнього (у загальному випадку передостаннього або того, з яким безпосередньо зв'язані кінцеві роботи) ряду мережі.

1.1 Для кожного елемента типу 2 останнього ряду мережі розв'язується одна з наступних одноетапних задач календарного планування (тут і далі під завданнями розуміються роботи вихідної мережі):

1.1.1 Мінімізація сумарного випередження завдань для допустимого розкладу на одному пристрої при максимально пізньому моменті початку виконання завдань і довільних директивних строках;

1.1.2 Мінімізація сумарного випередження завдань із довільними директивними строками для допустимого розкладу на одному пристрої.

Задачу 1.1.2 краще використовувати для випадку, коли штраф за сумарне випередження виконання завдань відносно їхніх директивних строків є істотним.

1.3 Для кожного елемента типу 4 останнього ряду мережі розв'язується одна з наступних двох задач календарного планування:

1.3.1 Є  $m$  незалежних паралельних пристроїв рівної продуктивності, що працюють без переривань, які виконують  $n$  завдань ( $l_i$  — тривалість виконання  $i$ -го завдання,  $i = \overline{1, n}$ ). Завдання повинні бути виконані до директивних строків  $d_i$ . Моменти запуску пристроїв довільні. Необхідно побудувати допустимий розклад, що максимізує критерій:

$$r_{j_1} = \max\{\min_{i=1, m} r_i\} \quad (2)$$

де  $r_j$  — момент запуску пристрою  $j$ ;  $j_1$  — номер пристрою, у якого момент запуску в оптимальному розкладі самий ранній (він є самим пізнім для всіх допустимих розкладів).

1.3.2 Є  $m$  незалежних паралельних пристроїв рівної продуктивності, що працюють без переривань, які виконують  $n$  завдань ( $l_i$  — тривалість виконання  $i$ -го завдання,  $i = \overline{1, n}$ ). Завдання повинні бути виконані до директивних строків  $d_i$ . Моменти запуску пристроїв довільні. Необхідно побудувати допустимий розклад, що максимізує критерій (2).

1.4 Для кожного елемента типу 5 останнього ряду мережі розв'язується одна з наступних двох задач календарного планування:

1.4.1 Є  $m$  незалежних паралельних пристроїв різної продуктивності, що працюють без переривань, які виконують  $n$  завдань ( $l_i^j$  — тривалість виконання  $i$ -го завдання на  $j$ -му пристрої, тривалості завдань не зв'язані між собою (можлива ситуація, що одне завдання виконується швидше іншого на одному пристрої та повільніше іншого на іншому пристрої)). Завдання повинні бути виконані до

директивних строків  $d_i$ . Моменти запуску пристроїв довільні. Необхідно побудувати допустимий розклад, оптимальний за критерієм (2).

1.4.2 Є  $m$  незалежних паралельних пристроїв різної продуктивності, що працюють без переривань, які виконують  $n$  завдань ( $l_i^j$  — тривалість виконання  $i$ -го завдання на  $j$ -му пристрої, тривалості завдань не зв'язані між собою). Завдання повинні бути виконані до директивних строків  $d_i$ . Моменти запуску пристроїв довільні. Необхідно побудувати допустимий розклад, оптимальний за критерієм (2).

Вибір задач 1.3.1 або 1.3.2, 1.4.1 або 1.4.2 визначається обранням критерієм оптимальності для мережевої БЗКП.

2 Отримані розклади для елементів типу 2–5 останнього ряду мережі однозначно задають найбільш пізні моменти готовності на виконання робіт на вході елементів типу 2–5. Ці моменти часу, у силу властивостей технологічної мережі, однозначно задають директивні строки виконання робіт для елементів типу 2–5 передостаннього ряду мережі або елементів типу 2–5, що безпосередньо (з точністю до елементів типу 1) передують елементам типу 2–5 останнього ряду мережі. Та ж ситуація стосується елементів типу 2–5 будь-яких рядів мережі. Для елементів типу 2–5 передостаннього ряду мережі реалізується п. 1 загального методу.

Для елементів типу накопичувач при визначенні директивних строків виконання робіт використовується наступне загальне правило: директивний строк робіт ліворуч від накопичувача дорівнює мінімальному з моментів запуску робіт праворуч від накопичувача. Найбільш ранній момент запуску робіт праворуч від накопичувача дорівнює максимальному з моментів закінчення робіт ліворуч від накопичувача.

Пункти 1 і 2 реалізуються доти, поки не будуть отримані розклади елементів типу 2–5 першого ряду мережі.

3 Розклади елементів типу 2–5 першого ряду мережі, у силу її властивостей, однозначно задають розклад усіх робіт початкової частини мережі. Субоптимальний розклад побудований.

Показано, що ефективність розв'язання БЗКП залежить від ефективності розв'язання першого рівня ЧМ КОП. Тому, статистично досліджується і обґрунтовується ефективність розв'язання задачі мінімізації сумарного зваженого моменту завершення виконання робіт з відносинами передування на одному пристрої. Показана ефективність ПДС-алгоритму розв'язання задачі для випадку, коли ваги всіх вершин графа передування, крім кінцевих, дорівнюють нулю.

Створено математичне забезпечення розв'язання задачі календарного планування «Складання розкладу виконання незалежних завдань ідентичними паралельними пристроями, моменти запуску яких менше спільного директивного строку» (МСЗПР, четвертий рівень ЧМ КОП).

*Постановка задачі.* Задана множина завдань  $J = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $m$  пристроїв однакової продуктивності, для кожного завдання  $j \in J$  відома тривалість виконання  $l_j$ . Усі завдання мають спільний директивний строк  $d$ . Моменти запуску пристроїв для виконання робіт  $T_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , можуть бути різні, і виконується  $T_i < d$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Необхідно побудувати розклад  $\sigma$  виконання завдань  $j \in J$  на  $m$  пристроях таких, щоб досягався мінімум функціонала:

$$F(\sigma) = \sum_{j \in J} \max[0; C_j(\sigma) - d],$$

де  $C_j(\sigma)$  — момент завершення виконання завдання  $j$  у розкладі  $\sigma$ .

У задачі МСЗПР, на відміну від задачі МСЗП, задані різні моменти запуску пристроїв, тому змінюється процедура побудови початкового розкладу  $\sigma^{уп}$ .

Пронумеруємо пристрої за неспаданням значень  $T_i$ , а завдання множини  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  за неспаданням значень  $l_j$  і розіб'ємо множину  $J$  на (необов'язково непусти) підмножини  $J_1, J_2, \dots, J_i, \dots, J_m$ , що попарно не мають спільних елементів, де  $J_i$  — множина завдань, що обслуговуються  $i$ -м пристроєм,  $i = \overline{1, m}$ , наступним чином. На першому кроці вибираємо завдання  $j$  з мінімальним  $l_j$  і призначаємо на пристрій  $i$  з мінімальним  $T_i$ . Визначаємо час звільнення пристрою  $i$ :  $T_i^{звільн} = T_i^{звільн} + l_j$ . Далі вибираємо чергове завдання для призначення на виконання і призначаємо на пристрій з мінімальним часом звільнення  $T_i^{звільн}$ . Таку процедуру виконуємо до тих пір, поки не будуть розподілені на виконання всі завдання. Позначимо отриманий розклад через  $\sigma^{уп}$ .

*Твердження 1.* Розклад  $\sigma^{уп}$  належить класу  $\Psi_P$ .

*Твердження 2.* Для всіх можливих розкладів  $\sigma \in \Psi_P$ , побудованих на множині завдань  $J$  в задачі МСЗПР, справедливо:  $P_{\max} - P_{\min} < m$ .

*Теорема.* Якщо в розкладах  $\sigma \in \Psi_P$ ,  $\sigma' \in \Psi_P$ , побудованих на заданій множині завдань  $J$  у задачі МСЗПР, максимальне число запізнених завдань однаково, то при  $R_{\Sigma}(\sigma) \neq 0$  і  $R_{\Sigma}(\sigma') \neq 0$  справедливо:  $R_{\Sigma}(\sigma) - R_{\Sigma}(\sigma') = \Delta_{\Sigma}(\sigma) - \Delta_{\Sigma}(\sigma')$ .

Досліджені та теоретично обґрунтовані властивості задачі. Доказано, що достатні ознаки оптимальності допустимих розв'язків, отримані для загальної задачі без моментів запуску пристроїв, справедливі для задачі МСЗПР. Розроблено ефективний ПДС-алгоритм розв'язання задачі з трудомісткістю  $O(mn \log n)$ . Характеристика  $\Omega_{\Sigma}(\sigma) = \min\{R_{\Sigma}(\sigma), \Delta_{\Sigma}(\sigma)\}$  є оцінкою відхилення функціоналу від оптимального значення, де  $R_{\Sigma}(\sigma)$  — сумарний резерв часу пристроїв у розкладі  $\sigma$ ;  $\Delta_{\Sigma}(\sigma)$  — сумарне запізнення усіх завдань відносно директивного строку. Наведено приклад розв'язання задачі та статистичні дослідження ПДС-алгоритму, які показали його високу ефективність. Були проведені випробування на задачах з розмірністю до 40000 завдань із числом пристроїв до 30-ти. Середній час розв'язання задач поліноміальною обчислювальною схемою А не перевищило 21 мс. Середня частота одержання оптимального розв'язку склала 77.7%, причому, зі зростанням числа завдань збільшується статистична ймовірність реалізації поліноміальної складової алгоритму. Середнє відхилення від оптимального розв'язку для алгоритму А становило 0.000159.

Також задача МСЗПР узагальнена на випадок, коли частина робіт не може порушувати спільний директивний строк. Розроблено наближений алгоритм, заснований на послідовному розв'язанні двох різних задач МСЗПР. Приведено три твердження, що характеризують теоретичні властивості наближеного алгоритму.

У **четвертому розділі** описана розробка та реалізація ІТ ієрархічного КОП у вигляді універсальної ієрархічної системи (УІС) КОП. Створена ІТ реалізує ряд викладених теоретичних результатів в конкретній практичній області: для

розв'язання задач КОП виробництв дрібносерійного типу. Проектування та опис УІС КОП виконувалося з використанням мови UML (Unified Modeling Language). Процес розробки включає організаційні, функціональні та технологічні аспекти реалізації, модель програмного забезпечення та концептуальну модель предметної області, що визначає організаційну структуру системи (рис. 2). Розроблена функціональна структура системи та структура комплексу технічних засобів, здійснено вибір засобів розробки. Було продемонстровано можливість застосування розробленої ІТ в рамках загальної інформаційної системи підприємства. Показано функції, які виконує ІТ, та взаємодію з системами ERP та MES. Були проведені статистичні дослідження системи, які показали перевагу УІС КОП над APS-системами, що використовують універсальні евристичні методи. Результати показують, що, як правило, універсальний метод діє у 1.5–2 рази швидше, але його ефективність за значенням функціоналу на 7–16% гірше (рис. 3).

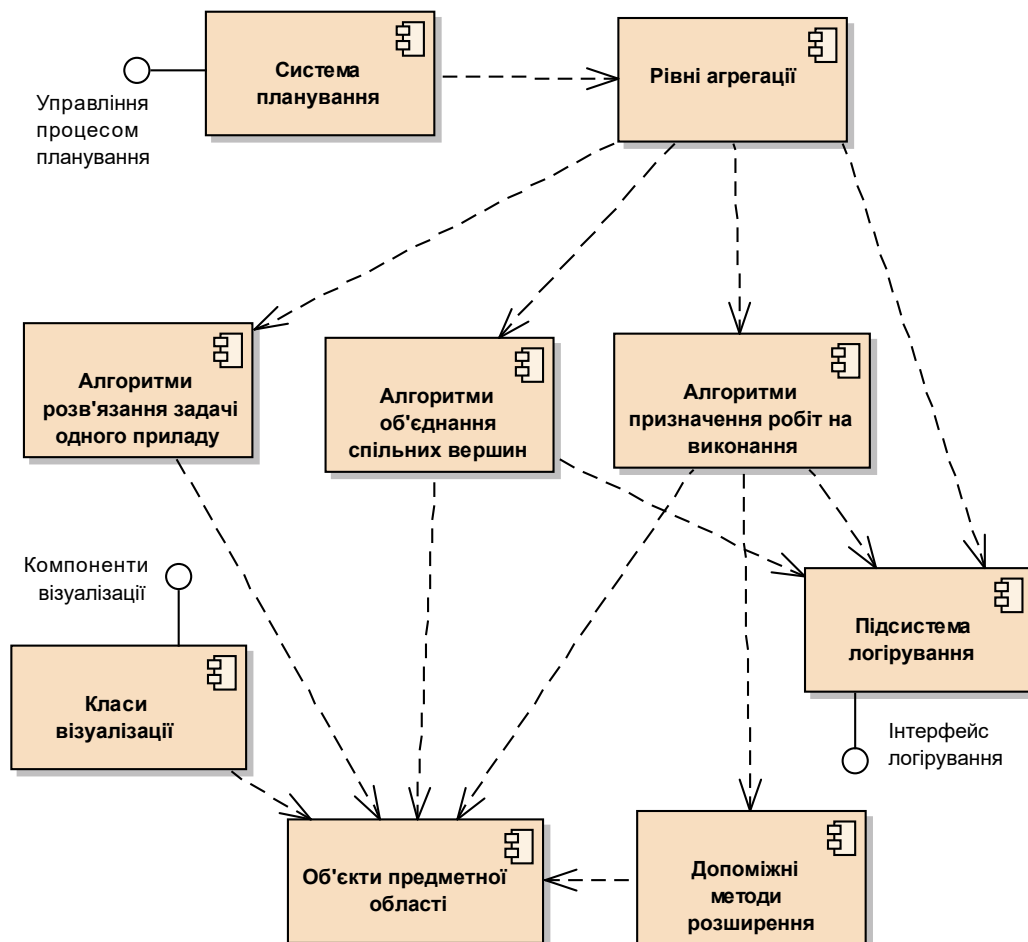


Рисунок 2 – UML-діаграма компонентів підсистеми алгоритмічного забезпечення

У рамках підходу щодо визначення архітектури підприємства, який детально розглянуто в розділі 1, було розроблено інформаційну технологію (APS-систему), що взаємодіє з іншими інформаційними системами підприємства та замінює функції планування MES-системи. Загалом розглянута інформаційна система дрібносерійного виробництва відповідає моделі, описаній в розділі 1. У рамках ІТ-інфраструктури підприємства дана система є окремим модулем, що виконує ряд функцій на різних рівнях автоматизації та взаємодіє з іншими інформаційними системами підприємства.

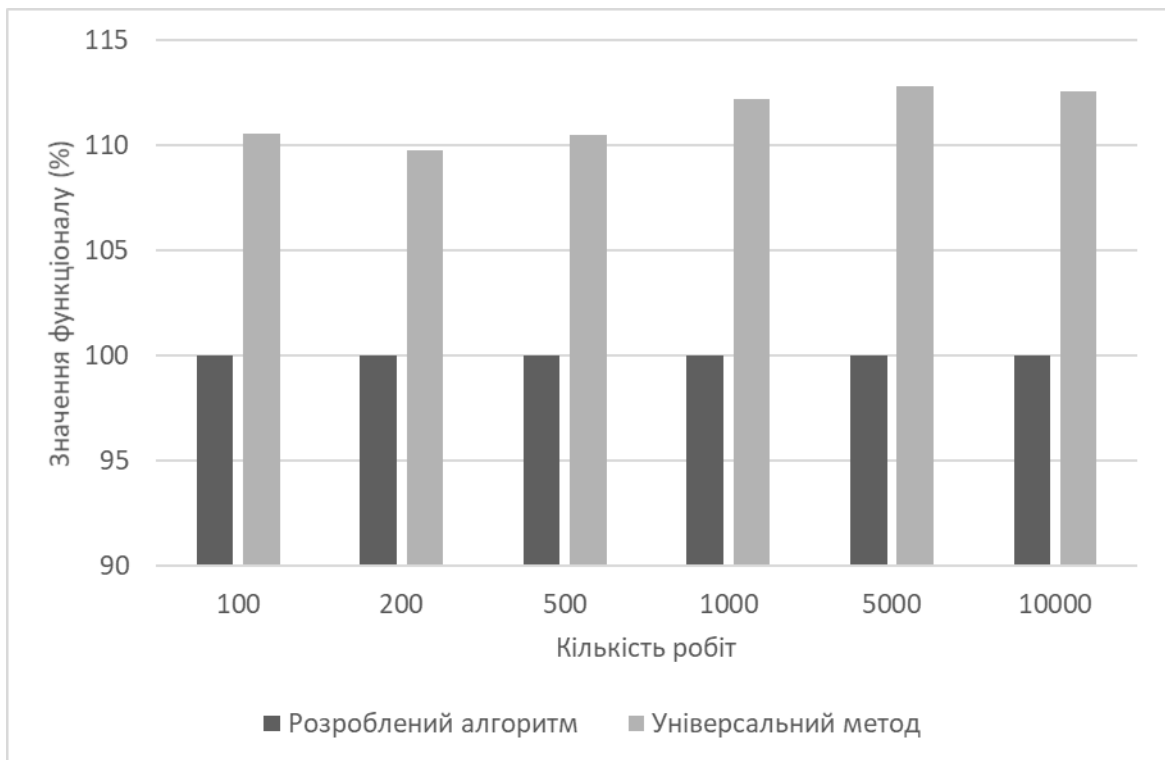


Рисунок 3 – Порівняння значення функціоналу

Чотирьохрівнева система планування, що складається з 5 блоків, частково застосовується на 3 рівні в функціональній ієрархії виробничих систем та виконує деякі функції MES-системи. Блок прийняття рішень чотирьохрівневої системи планування потребує залучення керівництва для прийняття рішень щодо узгодження змін замовлень чи термінів їх виконання, залучення додаткових ресурсів і т.п., що є частиною функцій ERP-системи. Взаємодія розробленої інформаційної технології з інфраструктурою виробничої системи показана на рис. 4.

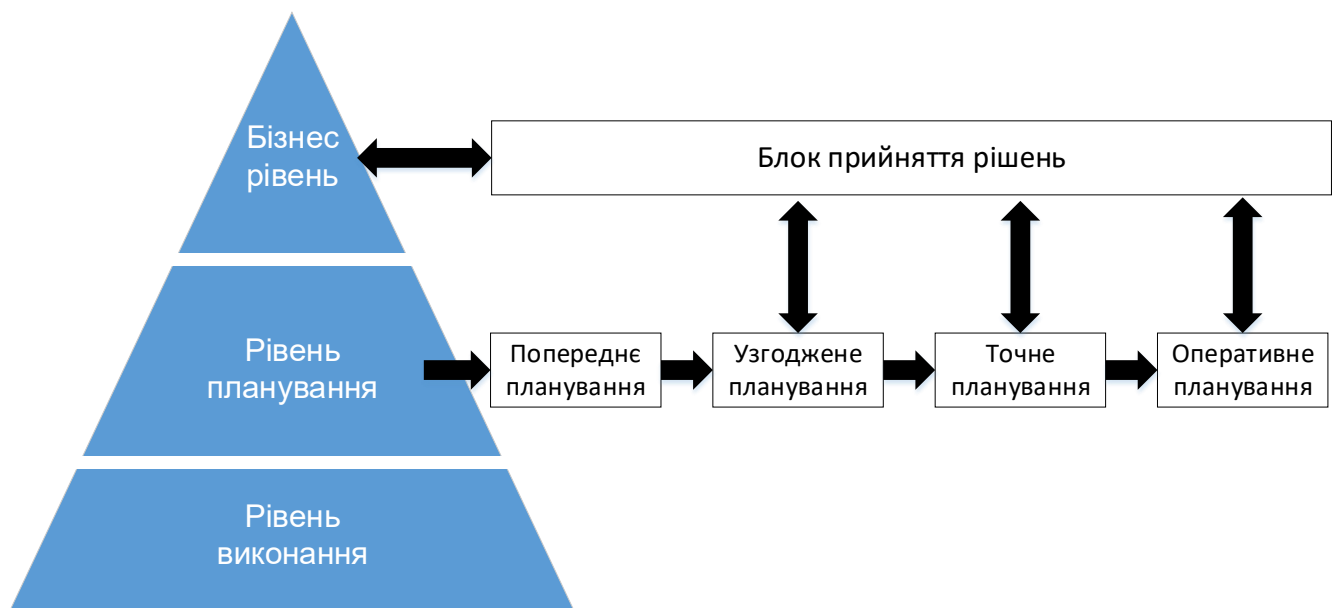


Рисунок 4 – Місце ІТ в інфраструктурі виробничих систем

Частково проектування та розробка ІТ розглядається у додатку Г (наведено опис варіантів використання, опис життєвого циклу і діяльності системи, опис об'єктної

моделі та фізичної моделі бази даних). Методика роботи в системі наводиться у додатку Д. Роботу системи продемонстровано у додатку Е на прикладі розв'язання задачі, наведеної у додатку Б. Акт впровадження системи див. додаток З.

У *висновках* сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

У *додатку В* статистично обґрунтовується ефективність застосування ТМП для планування довільних об'єктів з МПТПз оптимізацією за одним з п'яти критеріїв. Наведено приклад розв'язання задачі МЗМН. Показано, що наближений алгоритм розв'язання задачі МЗМН дозволяє розв'язувати реальні практичні задачі великої розмірності (перевірялися розмірності до 10000 робіт). Розв'язки, отримані наближеним алгоритмом, збіглися з отриманими точним ПДС-алгоритмом розв'язання задачі МЗМ в 98.47 % випадків. Таким чином, запропонований в поліноміальний алгоритм розв'язання задачі МЗМН, в силу наявності ваг тільки на кінцевих вершинах графа передування робіт, дає статистично значимо точний розв'язок і пропонується для використання при розв'язанні задачі для довільних об'єктів з МПТП. У п. В.3 наведено таблиці до статистичних досліджень системи УІС КОП.

В *інших додатках* наведені: додаткові матеріали з опису ЧМ КОП; приклади, що її ілюструють; діаграми, що показують проектування та розробку ІТ КОП у соціально-економічних системах на прикладі дрібносерійного виробництва; методику роботи в системі УІС КОП, приклад реалізації системи та акт її впровадження, список публікацій здобувача.

## ВИСНОВКИ

Для розв'язання актуальної науково-практичної задачі календарного та оперативного планування об'єктів з мережевим представленням технологічних процесів автор провів дослідження, які привели до наступних наукових та практичних результатів, що мають істотні переваги перед існуючими рішеннями:

1) описано соціально-економічні системи з мережевим представленням технологічних процесів (МПТП). Наведено вимоги, яким повинна задовольняти ефективна система календарного та оперативного планування (КОП). Проаналізовано сучасні моделі, методи та системи КОП. Показано, що ефективне КОП в сучасних ринкових умовах вимагає розробки нової ієрархічної моделі КОП та ІТ планування для соціально-економічних систем, що мають МПТП;

2) вперше запропоновані формальні моделі поопераційного мережевого представлення дискретних технологічних процесів, які, на відміну від існуючих, дозволяють багатоетапну задачу календарного планування звести до знаходження допустимого розв'язку з заданими директивними строками, що залежить від вибраного критерія;

3) вперше розроблена методологія побудови чотирьохрівневої моделі календарного та оперативного планування на основі системного аналізу, теорії ПДС-алгоритмів, методології агрегації та дезагрегації запропонованої мережевої моделі та узгодженого планування, що дозволило знаходити поопераційний план в області глобального екстремуму по вибраному критерію оптимізації;

4) підтверджена ефективність використання точних ПДС-алгоритмів в запропонованій чотирьохрівневій моделі планування, статистично підтверджена обчислювальна ефективність ПДС-алгоритму для задачі МЗМ, розроблений новий ефективний ПДС-алгоритм для задачі МСЗПР, для узагальненої задачі МСЗПР запропонований новий ефективний наближений алгоритм з теоретично обґрунтованими властивостями. Показано, що для будь-якого виду виробництва, при будь-якій вихідній технології виконання виробів і при будь-якій реалізації БЗКП, розв'язання задачі планування за одним з п'яти критеріїв оптимальності зводиться до отримання допустимого розв'язку БЗКП за критерієм максимізації моменту запуску найбільш ранньої роботи;

5) на основі запропонованих моделей та методів розроблена оригінальна інформаційна технологія календарного та оперативного планування в системах з мережевим представленням технологічних процесів;

6) показано, що ефективність розв'язання БЗКП залежить від ефективності розв'язання першого рівня ЧМ КОП. Тому, статистично досліджується і обґрунтовується ефективність розв'язання задачі МЗМН. Показана ефективність як ПДС-алгоритму, так і наближеного алгоритму її розв'язання. Наближений алгоритм дозволяє розв'язувати реальні практичні задачі (перевірялися розмірності до 10000 робіт), більшість задач розмірності до 5000 робіт розв'язується за менше, ніж 60 с. Розв'язки, отримані наближеним алгоритмом, збіглися з отриманими точним ПДС-алгоритмом в 98.47 % випадків. Статистично підтверджено, що використання ПДС-алгоритмів для побудови поопераційного плану в ЧМ КОП підвищує її ефективність на 7–16 %;

7) проведені статистичні дослідження задачі МСЗПР. Середній час розв'язання запропонованим методом при розмірності задач до 40000 склав менше 21 мс на комп'ютері з процесором Intel Pentium Core 2 Duo. Частота отримання оптимального розв'язку зменшується зі збільшенням розмірності та при розмірності 100 складає в середньому 95 %, при 3000 – від 39% до 66%. Доведено, що достатні ознаки оптимальності допустимих розв'язків, отримані для загальної задачі без моментів запуску пристроїв, справедливі для задачі МСЗПР. Розроблено ефективний ПДС-алгоритм розв'язання задачі з трудомісткістю  $O(mn \log n)$ . Характеристика  $\Omega_{\Sigma}(\sigma) = \min\{R_{\Sigma}(\sigma), \Delta_{\Sigma}(\sigma)\}$  є оцінкою відхилення функціоналу від оптимального значення, де  $R_{\Sigma}(\sigma)$  — сумарний резерв часу пристроїв у розкладі  $\sigma$ ;  $\Delta_{\Sigma}(\sigma)$  — сумарне запізнення усіх завдань відносно директивного строку. Наведено приклад розв'язання задачі та статистичні дослідження ПДС-алгоритму;

8) система використовується для автоматизації процесу планування виробництва на підприємстві ФГ «ЛІЕТА» (м. Мукачєво). Вона може розв'язувати задачі реальної практичної розмірності — сотні тисяч завдань та тисячі пристроїв, що їх виконують.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Стаття у зарубіжному журналі країни, що входить до ОЄСР*

- 1 Telenyk S., Pavlov A., Lisetsky T., et al. Research and modification of the universal method of scheduling and operational planning of objects with a network representation

of discrete type production // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – Seoul: Dr. Sang H. Lee, 2020. – Vol. 20, – No. 10. – pp. 31–39. doi: 10.22937/IJCSNS.2020.20.10.5. (Проіндексовано в **Web of Science**). *Здобувачу належать статистичні дослідження універсального методу КОП, експериментальні дослідження алгоритму розв'язання задачі МСЗПР, узагальнення задачі МСЗПР, алгоритм розв'язання та теоретичне дослідження узагальненої задачі.*

### *Статті у наукових фахових виданнях*

- 2 Павлов О.А. Інформаційна технологія ієрархічного планування та прийняття рішень в організаційно-виробничих системах [Текст] / О.А. Павлов, О.Б. Мисюра, Т.М. Лисецький та ін. [О.В. Мельников, Г.А. Аракелян, О.В. Щербатенко, В.В. Михайлов] // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2010. — №52. — С.3–14. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ). *Здобувачу належить інформаційна технологія для окремих модулів програмного забезпечення трьохрівневої моделі планування.*
- 3 Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Лисецький Т.Н. Объединение работ в группы с учетом их приоритетов, готовности к выполнению и директивных сроков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2011. — №53. — С.209–211. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ). *Здобувачу належить алгоритм визначення претендентів для об'єднання у «спільні вершини» для трьохрівневої та чотирьохрівневої моделей планування.*
- 4 Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Лисецький Т.Н. Составление расписания выполнения независимых заданий идентичными параллельными приборами, моменты запуска которых меньше общего директивного срока // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2013. — №58 — С.24–28. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ). *Здобувачу належить алгоритмічне та програмне забезпечення для розв'язання задачі.*
- 5 Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Лисецький Т.Н., Сперкач М.О., Халус Е.А. Четырехуровневая модель планирования, принятия решений и оперативного управления в сетевых системах с ограниченными ресурсами // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2013. — №58 — С.11–23. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ). *Здобувачу належать модифіковані методи агрегації та дезагрегації мережевої моделі (адаптація методів з трьохрівневої моделі планування), модифіковане обґрунтування зведення задачі планування до апроксимуючої задачі МЗМ.*
- 6 Згуровський М.З. Методология построения четырехуровневой модели планирования, принятия решений и оперативного планирования в сетевых системах с ограниченными ресурсами [Текст] / М.З. Згуровський, А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, О.В. Мельников, Т.Н. Лисецький // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2014. — №61. — с.60–84. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ).

*Здобувачу належать деякі положення формальної моделі технологічного процесу і методології розв'язання багаторівневої задачі календарного планування; модифікований метод узгодженого планування*

- 7 Павлов А.А. Алгоритмизация третьего и четвертого уровней четырехуровневой модели календарного и оперативного планирования и принятия решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами / А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, О.В. Мельников, И.П. Муха, Т.Н. Лисецкий // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “ВЕК+”, 2015. — №63. — с. 72–92. (Проіндексовано в міжнародній наукометричній базі РІНЦ). *Здобувачу належать деякі положення формальної моделі технологічного процесу і методології розв'язання багаторівневої задачі календарного планування; модифікований метод узгодженого оперативного планування.*
- 8 Lisetsky T.N. Efficiency research of the three-level model of small-series production planning // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології, — № 44 (1320), 2018. — С.19-25. (Проіндексовано в міжнародних наукометричних базах: **Index Copernicus**, DOAJ, WorldCat). *Здобувачу належить програмне забезпечення та експериментальні дослідження із розв'язання задачі мінімізації сумарного зваженого моменту виконання завдань одним пристроєм з відносинами порядку, заданими орієнтованим ациклічним графом, у якому ваги всіх вершин, крім кінцевих, дорівнюють нулю.*

### **Матеріали науково-технічних конференцій**

- 9 Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Лисецкий Т.Н. Реализация задачи суммарного взвешенного момента окончания выполнения заданий в системе иерархического планирования // Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у ХХІ столітті: Матеріали І Міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців 06–08 грудня 2012 р. — Ужгород: Закарпатський державний університет, 2013. — С. 112–116. *Здобувачу належать модифіковані методи агрегації та дезагрегації мережевої моделі (адаптація методів з трьохрівневої моделі планування), алгоритм визначення претендентів для об'єднання у «спільні вершини».*
- 10 Лисецкий Т.Н. Информационные технологии в четырехуровневой модели планирования, принятия решений и оперативного управления в сетевых системах с ограниченными ресурсами [Текст] / Т.Н. Лисецкий, О.В. Мельников // Автоматика-2014: матеріали 21-ї міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-річчю з дня народження академіка НАНУ О.І.Кухтенка, 23–27 вересня 2014 р., м. Київ: тези доповіді. — К.: Вид-во НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. — 323 с. — С. 204-205. *Здобувачу належить модифікований метод узгодженого планування.*
- 11 Павлов А.А. Алгоритмическое обеспечение третьего и четвертого уровней четырехуровневой модели планирования и принятия решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами / А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, О.В. Мельников, И.П. Муха, Т.Н. Лисецкий // Матеріали І-ї міжнародної конференції Infocom Advanced Solutions 2015, присвяченої 70-річчю кафедри автоматики та

управління в технічних системах НТУУ «КПІ», 24-25 листопада 2015 р., м. Київ. — К.: “ВЕК+”, 2015. — Секція №1. — с. 42-43. *Здобувачу належать деякі положення формальної моделі технологічного процесу і методології розв’язання багаторівневої задачі календарного планування; модифікований метод узгодженого оперативного планування.*

- 12 Павлов О.А. Чотирьохрівнева модель календарного та оперативного планування і прийняття рішень при функціонуванні оборонних підприємств дискретного типу / О.А. Павлов, О.Б. Місюра, О.В. Мельников, Т.М. Лисецький // Матеріали науково-практичної конференції «Інтелектуальний потенціал — фундамент майбутнього України та її Збройних Сил». — м. Київ, 17 листопада 2016 р. — 5 с. *Здобувачу належать модифіковані методи агрегації та дезагрегації мережевої моделі (адаптація методів з трьохрівневої моделі планування).*
- 13 Павлов О.А., Місюра О.Б., Мельников О.В., Лисецький Т.М. Система календарного та оперативного планування і прийняття рішень для підприємств дискретного типу // 19-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT 2017, May 22–25, 2017. — Institute for Applied System Analysis of National Technical University of Ukraine “KPI”, Kyiv, Ukraine. — С.312-313. *Здобувачу належить програмне забезпечення універсальної ієрархічної системи КОП виробництв дрібносерійного типу та опис його розробки.*

## АНОТАЦІЯ

**Лисецький Т.М. Інформаційна технологія календарного та оперативного планування в системах з мережевим представленням технологічних процесів.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Робота присвячена створенню інформаційної технології (ІТ) календарного та оперативного планування (КОП) в системах з мережевим представленням технологічних процесів на основі вискоєфективних методів розв’язання задач КОП, формалізації поопераційного мережевого представлення дискретних технологічних процесів, модифікації відомих процедур агрегації та дезагрегації мережевої моделі та узгодженого планування, обґрунтування зведення задачі планування за будь-яким з п’яти базових критеріїв до однієї задачі складання розкладів. Вперше створено цілісний комплекс моделей та методів — чотирьохрівнева модель КОП. Розроблено новий метод розв’язання NP-складної задачі теорії розкладів «Складання розкладу виконання незалежних завдань ідентичними паралельними пристроями, моменти запуску яких менше спільного директивного строку», який дозволяє отримувати точний розв’язок для задач із десятками тисяч змінних при виконанні ознак його оптимальності або наближений розв’язок з оцінкою відхилення від оптимуму при їх невиконанні. Створена інформаційна технологія календарного та оперативного планування в системах з мережевим представленням технологічних процесів. Система використовується на підприємстві ФГ «ЛЕТА» (м. Мукачеве).

**Ключові слова:** багатоступенчата задача календарного планування, оперативне планування, теорія розкладів.

## АННОТАЦІЯ

**Лисецкий Т.Н. Информационная технология календарного и оперативного планирования в системах с сетевым представлением технологических процессов.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 — Информационные технологии. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Министерство образования и науки Украины, Киев, 2021.

Работа посвящена созданию информационной технологии календарного и оперативного планирования (КОП) в системах с сетевым представлением технологических процессов на основе высокоэффективных методов решения задач КОП, формализации пооперационного сетевого представления дискретных технологических процессов, модификации известных процедур агрегации и дезагрегации сетевой модели и согласованного планирования, обоснования сведения задачи планирования по любому из пяти базовых критериев к одной задаче составления расписаний. Впервые создан целостный комплекс моделей и методов — четырехуровневая модель КОП. Разработан новый метод решения NP-трудной задачи теории расписаний «Составление расписания выполнения независимых заданий идентичными параллельными приборами, моменты запуска которых меньше общего директивного срока», позволяющий получать точное решение для задач с десятками тысяч переменных при выполнении признаков его оптимальности или приближенное решение с оценкой отклонения от оптимума при их невыполнении. Разработана информационная технология календарного и оперативного планирования в системах с сетевым представлением технологических процессов. Система используется на предприятии ФГ «ЛІЕТА» (г. Мукачєво).

**Ключевые слова:** многоступенчатая задача календарного планирования, оперативное планирование, теория расписаний.

## ABSTRACT

**Lisetsky T.M. Information technology of job-shop problem under precedence constraints.** As a manuscript.

A candidate of technical science (PhD) thesis in specialty 05.13.06 – Information technologies. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is dedicated to research of information technology (IT) of job-shop scheduling in systems with precedence constraints based on highly efficient job-shop scheduling methods. Thanks to formalization of precedence constraints, modification of aggregation and disaggregation procedures and the procedures of coordinated planning from earlier created three-level scheduling model (3LM), substantiation of reducing the planning problem by any of the five basic criteria to a single scheduling problem, operational (the third level of 4LM) and operative (the fourth level of 4LM) planning levels formalization and development of the algorithms for operational scheduling and adjustments, an integral

set of models and methods was created for the first time — the four-level model (4LM) of job-shop scheduling. The 4LM implements an efficient approximation method for Multi-Stage Job-Shop Scheduling Problems (MSJSP) in social and economic systems with precedence constraints and limited resources and methods of operational and operative planning. 4LM includes the decision-making unit (DMU) as a separate component that takes decisions during production planning.

The process of obtaining operational plan (third level of 4LM) based on results of coordinated planning (second level of 4LM) has been formalized: if optimality criterion is one of the five base criteria then the operational planning task is defined and solved as multi-stage job-shop scheduling problem (task or task group completion times become due times for multi-stage job-shop scheduling problem), an affective solving method use PDC-algorithms for single stage scheduling; if optimality criterion is synthetic (linear combination of base criteria) alternative methods for building operational plan were suggested. One of them is original modified method of coordinated planning. Two algorithms for coordinated plan correction were developed, which are used on the fourth level. The first algorithm is a modification of algorithmic planning procedure on 1-3 levels. The problem is solved by one of four base criteria or their linear combination. The second algorithm of operational planning incorporates formal algorithm (includes PDC-algorithms for hard combinatorial problems) and planning by experts. In case of possibility of results implementation, the second algorithm effectively solves the problem of operational adjustment of operational plan obtained on the third level of planning. Therefore, for the first time 4LM implements scheduling procedure as both formal procedures and as well as expert decisions. For the first time, the efficiency of the MSJSP solving method has been proved by studying the efficiency of the solving algorithm for a problem of the 4LM's first level with the use of statistical methods.

It is shown that regardless of type of industry, operations processing order and an implementation of JSP, solving of scheduling problem by one of these five optimality criteria is reduced to obtaining a feasible solution of the JSP by criterion of earliest job start time maximization. It is shown that solving efficiency of the JSP depends on efficiency of the first level of 4LM. Therefore, efficiency of MWCT problem solving is studied and statistically substantiated. The efficiency of the PDC-algorithm and the approximation algorithm has been proven for the case when weights of all nodes of the precedence graph, except the final ones, are zero (MWCTZ problem).

The mathematical models for solving a scheduling problem “Uniform parallel-machine scheduling with independent jobs whose start times are less than a common due date to minimize total tardiness” (MTTPM) (used at the fourth level of 4LM) have been created. Unlike others, the new method allows to get exact solution for problems with tens of thousands of variables in case of optimality criteria fulfillment otherwise approximate solution with evaluation of deviation from optimum.

The MTTPM problem was also generalized to the case when some or all jobs must not violate the common due date. An approximation algorithm based on the sequential solution of two different MTTPM problems has been developed. Three statements characterizing the theoretical properties of the approximation algorithm are proved. These statements allow: finding conditions when the problem has no solution; finding sufficient conditions of conditionally-optimal solution (optimal under condition that schedule is

found for given job set which all are non-delayed); finding statistically sufficient factors of solution optimality; finding the lowest limit of functional value of optimal solution.

The problem properties have been investigated and theoretically substantiated.

On the basis of 4LM, an IT for job-shop scheduling in systems with precedence constraints has been created. It was implemented as general-purpose job-shop scheduling information system. The system is used to automate the production planning process at the "LETA" enterprise (Mukachevo town). It can work with data of real production sizes — hundreds of thousands of jobs on thousands of machines.

**Keywords:** multi-stage scheduling problem, operational planning, scheduling theory.