

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Наукове видання

№ 2 (500) 2025

Видається 4 рази на рік

Заснований Національним університетом кораблебудування
імені адмірала Макарова у жовтні 1934 р.



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
протокол № 6 від 27.06.2025 р.

Редакційна колегія:

Сербін С. І. – д-р техн. наук, проф., головний редактор
Блінцов В. С. – д-р техн. наук, проф., заступник головного редактора
Торубара В. В. – секретар редакційної колегії
Костирко Т. М. – канд. соц. ком., голова сектору бібліометрії та наукометрії

Члени редакційної колегії:

Секція «Суднобудування»: Некрасов В. О. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Суднобудування»; Бондаренко О. В. – к.т.н., проф.; Жуков Ю. Д. – д.т.н., проф.; Зайцев В. В. – д.т.н., проф.; Коростильов Л. І. – д.т.н., проф.; Щедролюсов О. В. – д.т.н., проф.; Слободян С.О. – к.т.н., проф. НУК

Секція «Матеріалознавство»: Квасницький В. Ф. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Матеріалознавство»; Дубовий О. М. – д.т.н., проф.; Лебедев В. О. – д.т.н., проф.

Секція «Прикладна механіка»: Ткач М. Р. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Прикладна механіка»; Бурдун Є. Т. – к.т.н., проф.

Секція «Енергетичне машинобудування»: Радченко М. І. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Енергетичне машинобудування»; Трушляков Є. І. – д.т.н., проф. НУК; Тимошевський Б. Г. – д.т.н., проф.; Чердніченко О. К. – д.т.н., доц.

Секція «Теплоенергетика»: Шевцов А. П. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Теплоенергетика»; Димо Б. В. – к.т.н., проф.

Секція «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»: Павлов Г. В. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Рябенський В. М. – д.т.н., проф.

Секція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Тимченко В. Л. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»; Гордєєв Б. М. – д.т.н., проф.

Секція «Комп'ютерні науки та інформаційні технології»: Приходько С. Б. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології»; Чернов С. К. – д.т.н., проф.; Ушкац М. В. – д.т.н., доцент; Харитонов Ю. М. – д.т.н., проф.; Гайда А. Ю. – к.т.н., доц.

Секція «Економіка та менеджмент»: Іртішцева І. О. – д.е.н., проф., відповідальний редактор секції «Економіка та менеджмент»; Парсяк В. Н. – д.е.н., проф.; Рогов Т. К. – д.т.н., проф.; Ефімова Г. В. – д.е.н., проф. НУК

Секція «Технології захисту навколишнього середовища»: Трохименко Г. Г. – д.т.н., проф., відповідальний редактор секції «Технології захисту навколишнього середовища»

Співробітники організації України: Грінченко В. Т. – академік НАН України, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; Косой Б. В. – д.т.н., проф., Одеська національна академія харчових технологій; Хмельнюк М. Г. – д.т.н., проф., Одеська національна академія харчових технологій; Кривцун І. В. – академік НАН України, Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона, м. Київ; Міусов М. В. – д.т.н., проф., Одеська національна морська академія, м. Одеса; Руденко С. В. – д.т.н., проф., Одеський національний морський університет; Маркіна Л. М. – д.т.н., проф., Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління; Єгоров О. Г. – к.т.н., доц., Морське інженерне бюро, м. Одеса

Закордонні вчені: Бохдаль Т. (Tadeusz Bohdal) – д.т.н., проф., Кошалінський технологічний університет, м. Кошалін, Польща; Жили Вонг (Zili Wang) – проф., Університет науки і технологій провінції Цзянсу, м. Чженьцзян, КНР; Ся Гуйхуа (Xia Guihua) – проф., Харбінський інженерний університет, м. Харбін, КНР; Стахель А. (Aleksander Andrzej Stachel) – проф., Західно-померанський технологічний університет, м. Щецин, Польща; Хведелідзе П. Г. – проф., Батумський навігаційно-навчальний університет, м. Батумі, Грузія; Дзіда М. (Marek Dzida) – проф., Гданська Політехніка, м. Гданськ, Польща; Ровінські Л. (Lech Rowinski) – проф., Гданська Політехніка, м. Гданськ, Польща; Солесвік М. Б. – проф., бізнес-школа Північного університету, Норвегія

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1542 від 09.05.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04388

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (просп. Героїв України, буд. 9, м. Миколаїв, 54007, university@nuos.edu.ua, тел. 0512-42-42-80).

Журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України на підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 612 від 07.05.2019 р. (додаток 7) зі спеціальностей С1 «Економіка», D3 «Менеджмент», D6 «Секретарська та офісна справа», F3 «Комп'ютерні науки», G3 «Електрична інженерія», G4 «Енерговиробництво (за спеціалізацією)», G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», G8 «Матеріалознавство», G9 «Прикладна механіка», G11 «Машинобудування (за спеціалізаціями)»; на підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019 р. (додаток 8) зі спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища».

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька, французька, болгарська, румунська.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl

ЗМІСТ

СУДНОБУДУВАННЯ

<i>О. В. Аксьонов, В. В. Зайцев.</i> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АМФІБІЙНИХ СУДЕН НА ПОВІТРЯНІЙ ПОДУШЦІ З ГІБРИДНИМИ МЕХАНІЗМАМИ.....	3
<i>А. О. Астахова, В. О. Некрасов, О. П. Ястреба.</i> СТОХАСТИЧНЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОЖЕЖНИХ СУДЕН.....	10
<i>А. Я. Казарєзов, В. І. Комишник.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ МОТОРНОЇ ЯХТИ ЗА «ФРАНЦУЗСЬКОЮ ФОРМУЛОЮ».....	17
<i>К. О. Морозов.</i> ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНОВКИ ПАСАЖИРСЬКОГО САЛОНА СУДНА З АУТРИГЕРАМИ.....	25
<i>О. О. Морозов.</i> КОНЦЕПЦІЯ МОДУЛЬНО-ПОНТОННОГО ПОРОМУ-ПЕНТАМАРАНУ ДЛЯ ВАНТАЖНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА МАРШРУТІ «БІЛГОРОД-ДНІСТРОВСЬКИЙ – ОВІДІОПОЛЬ»	30
<i>В. О. Некрасов.</i> СТОХАСТИЧНА ТЕОРІЯ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ СЛУЖБОВО-ДОПОМІЖНОГО ТА ТЕХНІЧНОГО ФЛОТІВ.....	37
<i>Н. С. Соломонюк, Р. Ю. Білоус.</i> ВПЛИВ ЗАЛИВНОЇ ПІДЛОГИ НА ВІБРАЦІЇ ПІДКРІПЛЕНОЇ ПАЛУБНОЇ ПАНЕЛІ.....	46

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Н. Ю. Лебедєва, Ю. О. Казимиренко, А. В. Обрубов.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАРГАНЦЕВО-МІДНИХ СПЛАВІВ.....	50
<i>О. В. Фомін, О. В. Бурлуцький, І. І. Кульбовський, М. С. Ткачук.</i> ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	56
<i>Ю. О. Ярослав, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, Кондратьєва А. А., Лабарткава О. В., Савочкіна В. В.</i> НАНЕСЕННЯ ПЛАЗМОВИХ АЛЮМОМАТРИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ	66

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

<i>О. П. Шумілов, Ю. М. Галинкін, В. М. Січко, О. А. Костріков.</i> ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛІНДРИЧНОГО ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТУ З БОКОВИМИ РОЗРІЗАМИ.....	73
--	----

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>М. С. Бондаренко.</i> АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДВОСТУПЕНЕВОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ В ПТУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	80
<i>О. В. Литиш, А. А. Прилуцький.</i> ТЕПЛООБМІН ПРИ КИПІННІ ХОЛОДОАГЕНТА В ГЛАДКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБАХ СУДНОВИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВІТРООХОЛДЖУВАЧІВ.....	88
<i>В. М. Патлайчук, О. А. Козирко.</i> АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛООБМІННИКІВ «БОКС-КУЛЕР» В СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ АГРЕГАТІВ.....	95
<i>В. В. Савушкін, С. І. Сербін.</i> ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	104
<i>С. І. Сербін, А. В. Козловський.</i> ВИБІР МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ДЛЯ ЧИСЛОВОГО АНАЛІЗУ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОТУРБІННИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ	111
<i>С. І. Сербін, О. А. Шмарков.</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ КОНТАКТНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ НА ВОДНІ, З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКТОРНОЇ МОДЕЛІ.....	119

<i>В. В. Столярчук, О. Є. Золотько.</i> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЯМОТОЧНО ПОВІТРЯНО-ДЕТОНАЦІЙНОГО ДВИГУНА НА МОНОПАЛИВАХ.....	126
---	-----

<i>В. П. Шостак, Б. М. Личко.</i> РАНЖУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛИВ ПО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ.....	133
--	-----

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

<i>В. З. Кочмарський, О. П. Костюк.</i> АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЧИСТОТИ ТРУБНИХ СИСТЕМ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ	139
--	-----

<i>О. Ю. Менжсинський, А. С. Соломаха.</i> СЕЗОННИЙ КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ.....	145
---	-----

<i>В. В. Середа, І. В. Теличко.</i> ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ КОНДЕНСАТОРІВ ТЕРМІЧНИХ ОПРІСНЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	152
--	-----

<i>Ю. О. Шаповалов, М. М. Семенов.</i> МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ В УКРАЇНІ ВСЕСЕЗОННИХ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ПОНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ.....	158
--	-----

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Г. В. Бабкін, Д. В. Костенко, В. М. Овсянников.</i> ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	172
---	-----

<i>С. П. Денисюк, Г. С. Белоха, І. І. Богойко.</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	179
---	-----

<i>Д. В. Костенко, В. І. Локарев, С. Л. Трибулькевич, Г. С. Грудініна, О. П. Клочков, Г. В. Бабкін.</i> РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У ПУСКОГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ.....	187
---	-----

<i>В. М. Рябенський, С. Л. Трибулькевич, І. М. Худякова, О. С. Кудрявцев.</i> ПОРІВНЯННЯ АКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ З ПОСЛІДОВНОЮ І ПАРАЛЕЛЬНОЮ СХЕМАМИ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК.....	193
---	-----

<i>В. М. Рябенський, С. Л. Трибулькевич, І. М. Худякова, О. С. Кудрявцев.</i> КАСКАДНЕ НАРОЩУВАННЯ АКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ ІЗ ПОСЛІДОВНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ.....	201
--	-----

<i>М. В. Честних, А. В. Іванов.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У РОЗПЛАВІ ПРИ ЙОГО КОНДУКЦІЙНІЙ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ ОБРОБЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	208
---	-----

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>О. С. Герасін, М. В. Мазура, А. М. Топалов, А. О. Недо, А. В. Чепіжний, О. В. Рясна, О. Ю. Савойський.</i> ЛОГІСТИКА «ОСТАННЬОЇ МИЛІ»: ОГЛЯД СУЧАСНИХ РІШЕНЬ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗРОБКИ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ ДОСТАВЛЯННЯ	216
--	-----

<i>Є. О. Прищепов, А. П. Єременко.</i> РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ РІВНЯ РІДКИХ ТА СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ.....	226
---	-----

<i>С. В. Рагулін.</i> РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ТИПУ «ЛІТАЮЧЕ КРИЛО».....	232
---	-----

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Т. А. Вакалюк, Д. В. Фуріхата, В. М. Янчук, М. О. Медведєва, Н. В. Леут.</i> АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНОГО ТЕКСТУ.....	238
---	-----

<i>А. Ю. Гайда, І. Л. Михелев.</i> ДО ПРОБЛЕМИ НЕЗБАЛАНСОВАНИХ НАБОРІВ ДАНИХ ПРИ НАВЧАННІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	245
--	-----

<i>О. М. Гайтан, С. П. Альошин, І. Луаттар.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНУ РОСЛИН НА ОСНОВІ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	253
---	-----

<i>О. В. Задерейко, О. Г. Трофименко, С. І. Єленич, Н. І. Логінова, В. І. Гура, О. В. Троянський.</i> БАЗИ ДАНИХ ДЕРЖАВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ РЕЄСТРІВ: АНАЛІЗ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ СЕРВЕРІВ.....	263
<i>О. С. Орехов, Т. А. Фаріонова.</i> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ З МЕТРИК КОДУ DATA SCIENCE ТА MACHINE LEARNING JAVA-ЗАСТОСУНКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЇХ РОЗМІРУ.....	275
<i>І. В. Федосова, Л. Д. Котихова, О. І. Проніна.</i> РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ВИЗНАЧЕНІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ БУХГАЛТЕРСЬКОЇ КОМПАНІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	286
<i>І. М. Худякова.</i> ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ТА МЕТАВСЕСВІТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТРЕНАЖЕРІВ І ЛАБОРАТОРІЙ В ЕЛЕКТРОНІЦІ.....	292
<i>Л. С. Чернова, С. Д. Титов, І. А. Журавель, Л. С. Чернова, А. А. Зубарев, І. В. Майстер.</i> ОПТИМІЗАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ НА БАЗІ ТРИВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ ПРО ПРИЗНАЧЕННЯ В МЕНЕДЖМЕНТІ ІТ ПРОЄКТІВ.....	300
ЕКОНОМІКА ТА МЕНЕДЖМЕНТ	
<i>В. Л. Безсонний.</i> ЯКІСТЬ СЕРВІСУ В ГОТЕЛЯХ КИЄВА ЗА МОДЕЛЮ HOLSERV PLUS НА ОСНОВІ E-WOM.....	308
<i>В. Г. Рогов.</i> HR-АНАЛІТИКА ЯК ДРАЙВЕР ОПТИМІЗАЦІЇ ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ В УМОВАХ ІНДУСТРІЇ 5.0.....	316
<i>К. В. Трухачова.</i> ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОЇ РЕКЛАМИ НА ЗАСАДАХ ПЛАНУВАННЯ РЕКЛАМНОЇ ІДЕЇ ТА КОНКРЕТИЗАЦІЇ СТРАТЕГІЇ РЕКЛАМНОЇ КОМУНІКАЦІЇ	326
<i>С. М. Цвілий.</i> СТРАТЕГІЧНИЙ РОЗВИТОК ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ІНДУСТРІЇ ТУРИЗМУ УКРАЇНИ В ПОСТКОНФЛІКТОВУ ПЕРІОДІ.....	332
ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	
<i>Л. О. Герасимчук, Р. А. Валерко, Н. П. Кириленко, І. Г. Пацева.</i> ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ (НА ПРИКЛАДІ СФЕРИ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГІРНИЧОВИДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ).....	344
<i>Л. І. Демчук, О. М. Алпатова, Т. В. Курбет, Г. В. Скиба.</i> ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ВІД РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА ТОВ «БЕТОН ФЕКТОРІ» М.°ЖИТОМИРА.....	353
<i>О. В. Єгорова, О. О. Мислюк, О. М. Хоменко.</i> ВПЛИВ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ДЕПОНАЦІЮ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ЕДАФОТОПАХ МІСЬКОЇ ЕКОСИСТЕМИ.....	362
<i>В. В. Кірсанова.</i> МОЖЛИВЕ ПОЄДНАННЯ ВІТРОВОЇ ТА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СУДНОПЛАВСТВІ.....	371
<i>Н. М. Максимова, Ю. І. Чеберячко, Г. О. Петрушина, Д. О. Міняйло.</i> МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ ПІС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ЗАПАСІВ ВУГЛЕЦЮ В БІОМАСІ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ В КОНТЕКСТІ ІРСС	378
<i>М. В. Руда, М. І. Козак, М. М. Паславський.</i> КОНЦЕПЦІЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ І НЕБЕЗПЕК У КОНТЕКСТІ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН	386
<i>О. В. Рясських, І. В. Наконечний.</i> ОСІНЬО-ЗИМОВА ГЛИБОКОПРОФІЛЬНА ДИНАМІКА ТВЕРДОСТІ СУХО-СТЕПОВИХ ҐРУНТІВ БЕРЕЗАНСЬКО-БУЗЬКОГО МЕЖИРІЧЧЯ.....	394
<i>Т. М. Серга, Ю. С. Голік.</i> АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРАКТИК УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ.....	403
<i>Г. Г. Трохименко, О. Г. Грушина, Н. В. Гурець, І. В. Ремешевська.</i> АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БІОРЕМЕДІАНТУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ.....	411

<i>С. Ю. Ушкац, Н. І. Магась, С. С. Коваль, Н. Ю. Жолобенко. ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ РОЗЛИВІВ РОСЛИННИХ ОЛІЙ У ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ МИКОЛАЇВЩИНИ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОЇ АГРЕСІЇ: АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....</i>	<i>418</i>
<i>І. С. Шелкова, Є. В. Дорожко, Л. О. Коваленко, Е. В. Захарова, І. В. Мусієнко. ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПОЖЕЖНОЇ АКТИВНОСТІ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ</i>	<i>426</i>
<i>О. А. Гогоренко, Ю. Л. Мошенцев, А. В. Немченко. ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ СХЕМ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ</i>	<i>434</i>

УДК 005.8:51

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).40](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).40)

THE OPTIMIZATION MECHANISMS BASED ON A THREE-DIMENSIONAL ASSIGNMENT PROBLEM IN IT PROJECTS MANAGEMENT

ОПТИМІЗАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ НА БАЗІ ТРИВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ ПРО ПРИЗНАЧЕННЯ В МЕНЕДЖМЕНТІ ІТ ПРОЄКТІВ

Liubava S. Chernova

19chls92@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5191-0272

Sergiy D. Titov

ss1-ss10@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3747-4387

Iryna A. Zhuravel

iryna.zhuravel@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3747-4387

Liudmyla S. Chernova

liudmyla.chernova@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0666-0742

Anatoliy A. Zubarev

anatoly.zubarev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7868-4519

Inna V. Maister

inna.maister@nuos.edu.ua

ORCID: 0009-0003-1247-9266

Л. С. Чернова,

докт. техн. наук, доцент

С. Д. Титов,

доцент

І. А. Журавель,

аспірант

Л. С. Чернова,

докт. техн. наук, професор

А. А. Зубарев,

канд. техн. наук, доцент

І. В. Майстер*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The key tasks of the modern IT project management consist in efficient allocation of resources, optimization of working processes and increasing of the team efficiency. *Purpose.* The purpose of the research is to improve planning methods under conditions of multiple-factor uncertainty attributable to up-to-date project environments. The proposed optimization mechanisms allow minimizing the time and resources expenditure, increasing the teamwork efficiency, and ensuring the flexibility of management solutions in IT projects. *Method.* One of the best practices of solving these problems provides for using the discrete optimization methods, particularly the 3D-Assignment Problem. This problem involves the simultaneous distribution of three types of objects – for example, tasks, performers, and project stages – taking into account certain optimality criteria. The research examines optimization mechanisms based on the 3D-Assignment Problem in the context of IT project management. *Results.* The research confirmed that the 3D assignment problem effectively models the process of distributing managers, tasks, and performers. *Scientific novelty.* The work demonstrates a mathematical model that allows for the effective allocation of resources, tasks, and time intervals, taking into account constraints and optimality criteria. This is an important step in the development and analysis of existing approaches to solving the problem and substantiating the choice of optimization methods. This approach to assigning performers to implement the project showed that the optimal result significantly depends on the ratio of the number of project stages and the number of performers, and the cost minimization $W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ corresponds to a game-theoretic situation, which is commonly called the Nash equilibrium situation. *Practical importance.* The work is relevant from both a scientific and practical point of view, contributing to the development of new research methods. The results obtained demonstrate the possibilities of improving IT project planning, minimizing costs, and increasing team productivity. Conclusions are drawn regarding the practical application of the proposed mechanisms in real project management conditions.

Key words: optimization; three-dimensional assignment problem; project management; IT project; resources allocation; mathematic modeling; heuristic algorithms.

Анотація. У сучасному менеджменті ІТ проєкту ключовими завданнями є ефективний розподіл ресурсів, оптимізація робочих процесів і підвищення продуктивності команди. *Мета.* Метою дослідження є вдосконалення методів планування в умовах багатофакторної невизначеності, що характерна для сучасних проєктних середовищ. Необхідні оптимізаційні механізми, які дозволяють мінімізувати витрати часу та ресурсів, підвищити ефективність роботи команди та забезпечити гнучкість управлінських рішень в ІТ проєктах. *Методика.* Одним із перспективних підходів до вирішення цих проблем є використання методів дискретної оптимізації, зокрема тривимірної задачі про призначення (3D-Assignment Problem). Ця задача передбачає одночасний розподіл трьох типів об'єктів – наприклад, завдань, виконавців і етапів проєкту – з урахуванням певних критеріїв оптимальності. У ході дослідження розглядаються оптимізаційні механізми на основі тривимірної задачі про призначення у контексті управління ІТ проєктами. *Результати.* Дослідження підтвердило, що тривимірна задача про призначення ефективно моделює процес розподілу менеджерів, завдань і виконавців. *Наукова новизна.* Робота демонструє математичну модель, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси, завдання та часові інтервали з урахуванням обмежень і критеріїв оптимальності. Це є важливим кроком у розвитку і аналізі існуючих підходів до розв'язання задачі та обґрунтуванню вибору методів оптимізації. Такий підхід по призначенню виконавців для реалізації проєкту показав, що оптимальний результат суттєво залежить від співвідношення кількості етапів проєкту та кількості виконавців, а мінімізація витрат $W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ відповідає теоретико-ігровій ситуації, яку прийнято називати ситуацією рівноваги за Нешом. *Практична значимість.* Робота є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, сприяючи розвитку нових методів дослідження. Отримані результати демонструють можливості покращення планування ІТ проєктів, мінімізації витрат і підвищення продуктивності команди. Зроблено висновки щодо практичного застосування запропонованих механізмів у реальних умовах управління проєктами.

Ключові слова: оптимізація; тривимірна задача призначення; управління проєктами; ІТ-проєкт; розподіл ресурсів; математичне моделювання; евристичні алгоритми.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відомий формалізований підхід до розв'язку цієї оптимізаційної задачі припускає, що кожен виконавець може бути задіяним тільки на одному етапі проєкту та кількість виконавців дорівнює кількості етапів проєкту – $m = n$. У разі призначення i -го виконавця на реалізацію j -го етапу проєкту змінна величина x_{ij} , приймає значення $x_{ij} = 1$, і навпаки, $x_{ij} = 0$. В цьому випадку оптимізаційна задача про розподіл учасників за етапами загального проєкту або задача про призначення, коли $m = n$, має вигляд:

$$W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad \Omega_I : \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, & j = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, & i = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (1)$$

де n – кількість етапів загального проєкту; m – кількість виконавців ($m = n$); c_{ij} – витрати по призначенню j -го виконавця на виконання i -го етапу проєкту.

Матриця припустимих планів цієї оптимізаційної задачі має вигляд

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} = x_{ij_{n \times n}}, \quad (2)$$

та містить по одній одиниці в кожному рядку і в кожному стовпчику.

Аналіз такого підходу по призначенню виконавців для реалізації проєкту показує, що оптимальний

результат суттєво залежить від співвідношення кількості етапів проєкту та кількості виконавців, а мінімізація витрат $W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$ відповідає теоретико-ігровій ситуації, яку прийнято називати ситуацією рівноваги за Нешом.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Оптимізаційні задачі у менеджменті ІТ проєкту є предметом активних досліджень у різних наукових напрямках, включаючи дискретну математику, операційний аналіз та інтелектуальні системи управління. Одним із важливих підходів до вирішення проблеми ефективного розподілу ресурсів є використання задачі про призначення, зокрема її тривимірного узагальнення.

Класична задача про призначення була запропонована Куном [1, 2] і розв'язується методом угорського алгоритму. У подальших дослідженнях [3, 4] було розглянуто її узагальнені варіанти, включаючи багатовимірні моделі. Тривимірна задача про призначення є NP-складною і вимагає використання спеціальних методів для її розв'язання.

У науковій літературі представлено широкий спектр методів для розв'язання тривимірної задачі про призначення. Дослідження Gavish & Graves [5] запропонували комбінаторні підходи, тоді як сучасні роботи [6, 7] розглядають застосування лінійного програмування та метаевристичних алгоритмів, таких як генетичні алгоритми та алгоритми рою частинок.

Управління проєктами передбачає ефективний розподіл ресурсів, що є предметом досліджень у працях Shen & Wang [8], де представлено адаптивні моделі на основі математичного програмування. Інші роботи [9, 12, 15] аналізують розподіл завдань у реальних умовах із динамічними обмеженнями.

Сучасні дослідження [10] вказують на можливість використання машинного навчання та глибоких нейронних мереж для покращення результатів оптимізації у складних проєктах. Інтеграція тривимірної задачі про призначення з цифровими платформами управління проєктами є перспективним напрямом розвитку.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

На практиці виникають задачі, в яких необхідно відхилитися від вимог класичної задачі про призначення – один виконавець на один етап проєкту і навпаки. Такою задачею є відома комбінаторна задача про систему різних представників [11]. В цьому типі задач на вакантне місце треба призначити вже декілька виконавців.

Не менш важливим є набір задач про призначення виконавців за додаткової вимоги або властивості (стать, вік, стаж і таке інше). Окрім традиційних двох властивостей (i, j) претендент має третю – (k) . Матриця призначень $C = \|C_{ijk}\|_{n \times n \times n}$ стає вже тривимірною.

Аналіз проблеми демонструє значну увагу до оптимального призначення ресурсів у проєктному менеджменті. Тривимірна задача про призначення є важливим інструментом у вирішенні подібних проблем, а її вдосконалення можливе завдяки поєднанню математичних та інтелектуальних методів.

З огляду на це, доцільно розробити модель тривимірної класичної і узагальненої задачі про призначення та навести алгоритми їх розв'язку. Використання цієї моделі у проєктному менеджменті сприятиме формуванню оптимального мережевого графіка та розподілу ролей у команді проєкту.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є розробка та обґрунтування оптимізаційних механізмів на основі тривимірної задачі про призначення для підвищення ефективності управління ресурсами ІТ проєкту. У дослідженні передбачається аналіз існуючих підходів до розв'язання задачі призначення, побудова математичної моделі для оптимального розподілу ресурсів, завдань і часових інтервалів, а також розробка алгоритмічних рішень із застосуванням методів лінійного програмування та евристичних алгоритмів. Очікуваним результатом є підвищення продуктивності проєктних команд та мінімізація витрат шляхом впровадження запропонованих механізмів у процес планування та управління проєктами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель тривимірної задачі про призначення виконавців ІТ проєкту з урахуванням обмежень, характерних для проєктного менеджменту.

2. Запропонувати оптимізаційні механізми для ефективного розподілу ресурсів, завдань і часових інтервалів у рамках проєктних процесів.

3. Розробка та тестування алгоритмічного рішення на основі запропонованої моделі для оцінки його ефективності в реальних сценаріях управління ІТ проєктами.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що двоіндексною або класичною двовимірною задачею про призначення є задача вигляду:

$$W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

$$\Omega_I: \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, & j = 1, \dots, 5, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, & i = 1, \dots, 5, \\ x_{ij} = 0 \vee 1 \end{cases}$$

де $C = \|C_{ij}\|_{n \times n}$ – матриця значень ефективності призначення; $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$ – план призначення.

Тривимірною класичною задачею про призначення назовемо задачу вигляду:

$$W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min,$$

$$\Omega_I: \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, & j = 1, \dots, n, & k = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, & i = 1, \dots, n, & k = 1, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, & k = 1, \dots, n, & j = 1, \dots, n, \\ \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, & i = 1, \dots, n, & j = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, & k = 1, \dots, n, & i = 1, \dots, n, \\ \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, & j = 1, \dots, n, & i = 1, \dots, n, \\ x_{ijk} = 0 \vee 1, & i, j, k = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (3)$$

де $C = \|C_{ijk}\|_{n \times n \times n}$ – матриця значень по призначенню; $X = \|x_{ijk}\|_{n \times n \times n}$ – план призначення.

Теоретичне обґрунтування розв'язку тривимірної задачі про призначення (3) проведемо з позицій планарної декомпозиції. Це означає що тривимірну матрицю $C = \|C_{ijk}\|_{n \times n \times n}$ декомпозируємо на набір двовимірних задач. Кожна спрощена двовимірна задача є результатом планарного (площинного) розрізу тривимірної матриці по рядкам та стовпчикам. Кількість таких наборів залежить від n і дорівнює $3n$ декомпозованих задач. Кожну таку задачу вже можливо розв'язати за *угорською методикою*. Сумарний аналіз, отриманих розв'язків дозволяє отримати розв'язок тривимірної задачі про призначення в цілому.

Назвемо тривимірною узагальненою (глибини h) задачею про призначення задачу вигляду:

$$W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min,$$

$$\Omega_I: \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ijk} = h, & j = 1, \dots, n, & k = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ijk} = h, & i = 1, \dots, n, & k = 1, \dots, n, \\ \sum_{k=1}^n x_{ijk} = h, & i = 1, \dots, n, & j = 1, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n x_{ijk} = h, & i = 1, \dots, n, & j = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ijk} = h, & k = 1, \dots, n, & i = 1, \dots, n, \\ \sum_{k=1}^n x_{ijk} = h, & j = 1, \dots, n, & i = 1, \dots, n, \end{cases}$$

$$x_{ijk} = 0 \vee 1, \quad i, j, k = 1, \dots, n,$$

Теоретичне обґрунтування до розв'язку узагальненої задачі про призначення проінтерпретуємо з позицій задачі динамічної оптимізації. Згідно з концепцією динамічної оптимізації весь ланцюг розв'язку задачі розбивають на окремі елементарні етапи. На кожному такому етапі розв'язується однотипна спрощена задача. Водночас, побудова такого алгоритму підкорюється відомому принципу Р. Белмана [12]. Принцип Р. Белмана ґрунтується на тому, що яким би не було початкове становище системи на довільному поточному етапі оптимізації, наступний етап обирається з умови оптимальності відносно попереднього стану. Такий підхід забезпечує у ланцюгах розв'язку не локально оптимальний, а глобально оптимальний розв'язок для процесу в цілому.

В нашому випадку для розв'язку узагальненої задачі про призначення фіксується попередній оптимальний стан підстановкою граничних значень (великих або маленьких) в залежності від смислу задачі, у матрицю $C^{(k-\text{const})} = \| C_{ijk} \|_{n \times n \times n}$. Наступну задачу розв'язують канонічним методом (угорський метод). Потім знову в оптимальні позиції вже зміненої матриці $C^{(k-\text{const})} = \| C_{ijk} \|_{n \times n \times n}$ підставляють граничні значення та розв'язують задачу. Кількість ітерацій дорівнює максимальній глибині узагальнення задачі про призначення. Наприкінці залишається вибрати оптимальний план.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Застосуємо запропонований підхід для розв'язку модельних задач.

Розглянемо знаходження оптимального відображення між трьома множинами М (Менеджери / Керівники), Т (Завдання / Проекти), W (Виконавці / Ресурси з використанням класичної тривимірної задачі призначення. Завдання полягає в тому, щоб знайти таке зіставлення пар (М, Т, W), яке мінімізує або максимізує певний цільовий критерій (витрати, продуктивність, час виконання тощо).

У ІТ компанії, що виконує кілька проєктів одночасно, і необхідно призначити менеджерів (М) до проєктів, команд виконавців – до проєктів (Т), виконавців (W) – до конкретних завдань у межах цих проєктів.

Рішення цієї задачі дозволяє оптимально розподілити відповідальність і ресурси, враховуючи компетентностей, завантаженість, дедлайни та інші обмеження.

Компанія розподіляє ІТ-проєкти серед менеджерів і виконавців, при цьому менеджери мають різний рівень досвіду та компетенцій, проєкти мають різний рівень складності та бюджету, виконавці мають різні навички та продуктивність. Потрібно знайти оптимальне (М, Т, W) призначення, щоб менеджери керували відповідними проєктами, виконавці отримали завдання відповідно до своїх компетентностей, мінімізувати витрати та час реалізації проєктів.

Застосування 3D-задачі призначення дозволяє розробити *матрицю відповідності* між менеджерами, проєктами та виконавцями, де кожна комбінація має свою вартість або ефективність. Після розв'язання отримуємо оптимальний набір призначень.

$$W_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min,$$

$$\Omega_I: \begin{cases} \sum_{i=1}^3 x_{ijk} = 1, & j = 1, \dots, 3, & k = 1, \dots, 3, \\ \sum_{j=1}^3 x_{ijk} = 1, & i = 1, \dots, 3, & k = 1, \dots, 3, \\ \sum_{i=1}^3 x_{ijk} = 1, & k = 1, \dots, 3, & j = 1, \dots, 3, \\ \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, & i = 1, \dots, 3, & j = 1, \dots, 3, \\ \sum_{j=1}^3 x_{ijk} = 1, & k = 1, \dots, 3, & i = 1, \dots, 3, \\ \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, & j = 1, \dots, 3, & i = 1, \dots, 3, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{ijk} = 0 \vee 1, \quad i, j, k = 1, \dots, 3,$$

$$\text{де, } C = \| c_{ijk} \|_{3 \times 3 \times 3} = \| C^{(k=1)} \cup C^{(k=2)} \cup C^{(k=3)} \| =$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} 7 & 4 & 1 \\ 6 & 6 & 8 \\ 2 & 5 & 5 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 2 & 8 & 2 \\ 2 & 3 & 8 \\ 4 & 9 & 9 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 6 & 3 & 3 \\ 7 & 3 & 8 \end{bmatrix} \right\|$$

Ланцюги всіх модифікацій згідно запропонованої методики наведено нижче:

$$\begin{bmatrix} 7 & 4 & 1 \\ 6 & 6 & 8 \\ 2 & 5 & 5 \end{bmatrix} \xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 6 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 6 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 8 & 2 \\ 2 & 3 & 8 \\ 4 & 9 & 9 \end{bmatrix} \xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 \\ 0 & 1 & 6 \\ 0 & 5 & 5 \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \\ 0 & 4 & 5 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 6 & 3 & 3 \\ 7 & 3 & 8 \end{bmatrix} \xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 6 & 5 \\ 3 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 5 \end{bmatrix}.$$

Червоними нулями позначені позиції оптимальних розв'язків. З останніх ланцюгів перетворень мас-мо оптимальні розв'язки за планарними перерізами $C^{(k=1)}, C^{(k=2)}, C^{(k=3)}$.

$$\begin{aligned} C^{(k=1)}: \begin{bmatrix} 6 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 3 \end{bmatrix} &\rightarrow X_{opt}^{(k=1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C^{(k=2)}: \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \\ 0 & 4 & 5 \end{bmatrix} &\rightarrow X_{opt}^{(k=2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C^{(k=3)}: \begin{bmatrix} 0 & 6 & 5 \\ 3 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 5 \end{bmatrix} &\rightarrow X_{opt}^{(k=3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Сумарний аналіз цих трьох частинних розв'язків дозволяє отримати глобальний оптимальний розв'язок:

$$\begin{aligned} X_{min}^{opt} &= \|x_{ijk}\|_{3 \times 3 \times 3} = \|X_{opt}^{(k=1)} \cup X_{opt}^{(k=2)} \cup X_{opt}^{(k=3)}\| = \\ &= \left\| \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \right\| \end{aligned}$$

Класична тривимірна задача призначення є потужним інструментом для розподілу ресурсів у проектно-му менеджменті. Її розв'язок забезпечує оптимальне призначення менеджерів, проектів та виконавців з урахуванням обмежень та бізнес-метрик, що підвищує ефективність управління проектами.

З використанням тривимірної узагальненої задачі про призначення (3D-Assignment Problem) змодельовано ситуацію, коли необхідно оптимально розподілити три типи ресурсів між собою. Для глибини $h=2$ можна розглядати призначення у вигляді взаємопов'язаних рівнів:

- Рівень 1 (*Менеджери* $\rightarrow$ *Завдання*): кожному менеджеру призначається відповідний набір завдань.
- Рівень 2 (*Завдання* $\rightarrow$ *Виконавці*): кожне завдання розподіляється між виконавцями відповідно до їхніх компетенцій.

Тобто, процес розподілу ресурсів має дворівневу структуру, оскільки необхідно провести призначення менеджерів на певні групи завдань, а також окремих виконавців на конкретні завдання в межах цих груп. Розв'язок задачі сприяє оптимальному розподілу ресурсів у IT проектах з мінімізацією витрат або часу виконання.

У компанію, що керує кількома паралельними IT-проектами, кожен менеджер (М) може керувати обмеженою кількістю, у кожному проекті є набір завдань (Т), які потрібно виконати, для кожного завдання є доступні виконавці (W), що мають різний

рівень кваліфікації та продуктивності. Необхідно знайти такий розподіл ($M \rightarrow T \rightarrow W$), щоб мінімізувати загальні витрати (час, бюджет) або максимізувати продуктивність проектної команди.

Знайдемо розв'язок тривимірної узагальненої задачі про призначення (глибини $h=2$)

$$\begin{aligned} W_I &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min, \\ \Omega_I: &\begin{cases} \sum_{i=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad j = 1, \dots, 3, \quad k = 1, \dots, 3, \\ \sum_{j=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, 3, \quad k = 1, \dots, 3, \\ \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad k = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, 3, \\ \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, 3, \\ \sum_{j=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad k = 1, \dots, 3, \quad i = 1, \dots, 3, \\ \sum_{k=1}^3 x_{ijk} = 1, \quad j = 1, \dots, 3, \quad i = 1, \dots, 3, \end{cases} \\ x_{ijk} &= 0 \vee 1, \quad i, j, k = 1, \dots, 3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де, } C &= \|c_{ijk}\|_{3 \times 3 \times 3} = \|C^{(k=1)} \cup C^{(k=2)} \cup C^{(k=3)}\| = \\ &= \left\| \begin{bmatrix} 3 & 8 & 1 \\ 9 & 7 & 5 \\ 3 & 9 & 9 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 1 & 9 & 4 \\ 1 & 9 & 9 \\ 3 & 9 & 2 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 5 & 1 & 5 \\ 5 & 2 & 8 \\ 8 & 9 & 2 \end{bmatrix} \right\|. \end{aligned}$$

Розв'язок: Розрахунки для узагальненої задачі мають вигляд:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 3 & 8 & 1 \\ 9 & 7 & 5 \\ 3 & 9 & 9 \end{bmatrix} &\xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 2 & 7 & 0 \\ 4 & 3 & 0 \\ 0 & 6 & 6 \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 6 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & 9 & 4 \\ 1 & 9 & 9 \\ 3 & 9 & 2 \end{bmatrix} &\xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 8 & 3 \\ 0 & 8 & 8 \\ 1 & 7 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 8 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \\ \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 8 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} &\rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 7 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 5 & 1 & 5 \\ 5 & 2 & 8 \\ 8 & 9 & 2 \end{bmatrix} &\xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 4 \\ 3 & 0 & 6 \\ 6 & 7 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 6 \\ 3 & 7 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Червоними нулями позначені позиції оптимальних розв'язків за планарними перерізами $C^{(k=1)}, C^{(k=2)}, C^{(k=3)}$.

Другий модифікаційний крок пов'язаний з узагальненням задачі. В кожному рядку та стовпчику

оптимальної матриці призначення необхідно мати не одну, а дві одиниці. Відповідні перетворення наведені нижче:

$$C^{(k=1)}: \begin{bmatrix} 2 & 4 & M \\ 4 & M & 0 \\ M & 3 & 6 \end{bmatrix} \xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 2 & M \\ 4 & M & 0 \\ M & 0 & 3 \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & 2 & M \\ 4 & M & 0 \\ M & 0 & 3 \end{bmatrix},$$

$$C^{(k=2)}: \begin{bmatrix} 0 & M & 2 \\ M & 0 & 7 \\ 2 & 0 & M \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & M & 0 \\ M & 0 & 5 \\ 2 & 0 & M \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & M & 0 \\ M & 0 & 0 \\ 2 & 0 & M \end{bmatrix},$$

$$C^{(k=3)}: \begin{bmatrix} 1 & M & 4 \\ M & 0 & 6 \\ 3 & 7 & M \end{bmatrix} \xrightarrow[i-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & M & 3 \\ M & 0 & 6 \\ 0 & 4 & M \end{bmatrix} \xrightarrow[j-\text{const}]{c_{ij}-\min(c_{ij})} \begin{bmatrix} 0 & M & 0 \\ M & 0 & 3 \\ 0 & 4 & M \end{bmatrix}.$$

Червоною літерою позначено достатньо велике число, яке не чутливе до віднімання від нього скінченних чисел матриці.

З останніх ланцюгів перетворень маємо оптимальні розв'язки за планарними перерізами $C^{(k=1)}, C^{(k=2)}, C^{(k=3)}$

$$C^{(k=1)}: \begin{bmatrix} 0 & 2 & M \\ 4 & M & 0 \\ M & 0 & 3 \end{bmatrix} \rightarrow X_{opt}^{(k=1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C^{(k=2)}: \begin{bmatrix} 0 & M & 0 \\ M & 0 & 0 \\ 2 & 0 & M \end{bmatrix} \rightarrow X_{opt}^{(k=2)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C^{(k=3)}: \begin{bmatrix} 0 & M & 0 \\ M & 0 & 3 \\ 0 & 4 & M \end{bmatrix} \rightarrow X_{opt}^{(k=3)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Сумарний аналіз цих трьох частинних розв'язків дозволяє отримати глобальний оптимальний розв'язок

$$X_{min}^{opt} = \|x_{ijk}\|_{3 \times 3 \times 3} = \|X_{opt}^{(k=1)} \cup X_{opt}^{(k=2)} \cup X_{opt}^{(k=3)}\| =$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right\|$$

Глибина $h = 2$ у тривимірній задачі про призначення відображає дворівневу ієрархію розподілу ресурсів у проєктному управлінні. Це допомагає будувати ефективні моделі управління командами та знижувати ризики перевантаження ключових виконавців.

В середовищі комп'ютерного пакету Maple® перевірено правильність розв'язання тривимірних узагальнених задач про призначення. Фрагмент вихідного коду програми наведений нижче:

```
zf:=add( add( add(A[i,j,k]*x[i,j,k],i=1..nr), j=1..nr ),
k=1..nr);
#~~~~~
prhc:=2;
#####
for k to nr do
eq[1,k]:=seq(add(x[i,j,k],j=1..nr)=prhc,i=1..nr);
eq[2,k]:=seq(add(x[i,j,k],i=1..nr)=prhc,j=1..nr);
od;
```

```
eqf11:= {seq(eq[1,i],i=1..nr)};
```

```
eqf12:= {seq(eq[2,i],i=1..nr)};
```

```
eqf1s:= eqf11 union eqf12;
```

```
for i to nr do
```

```
eq[3,i]:=seq(add(x[i,j,k],j=1..nr)=prhc,k=1..nr);
```

```
eq[4,i]:=seq(add(x[i,j,k],k=1..nr)=prhc,j=1..nr);
```

```
od;
```

```
eqf21:= {seq(eq[3,i],i=1..nr)};
```

```
eqf22:= {seq(eq[4,i],i=1..nr)};
```

```
eqf2s:= eqf21 union eqf22;
```

```
for j to nr do
```

```
eq[5,j]:=seq(add(x[i,j,k],i=1..nr)=prhc,k=1..nr);
```

```
eq[6,j]:=seq(add(x[i,j,k],k=1..nr)=prhc,i=1..nr);
```

```
od;
```

```
eqf31:= {seq(eq[5,i],i=1..nr)};
```

```
eqf32:= {seq(eq[6,i],i=1..nr)};
```

```
eqf3s:= eqf31 union eqf32;
```

```
#####
```

```
eqfss:= eqf1s union eqf2s union eqf3s;
```

```
#####
```

```
`Binary`;
```

```
with(Optimization):
```

```
ss1:=LPSolve(zf, eqfss, assume = {binary});
```

```
Aoptb:=Matrix(nr):
```

```
for i to nr do
```

```
for j to nr do
```

```
Aoptb[i,j]:=rhs(ss1[2,nr*(i-1)+j])
```

```
end do;
```

```
end do;
```

```
ss1m:=LPSolve(zf,eqfss,assume={binary},maximize);
```

```
Aoptb1:=Matrix(nr):
```

```
for i to nr do
```

```
for j to nr do
```

```
Aoptb1[i,j]:=rhs(ss1m[2,nr*(i-1)+j])
```

```
end do;
```

```
end do;
```

```
###
```

```
X[optmin]=Aoptb, X[optmax]=Aoptb1;
```

```
W[min]=ss1[1],W[max]=ss1m[1];
```

Порівняння комп'ютерного та ручного розрахунків показує збіг результатів.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто оптимізаційні механізми, побудовані на основі тривимірної задачі про призначення, та їх застосування в контексті управління ІТ проєктом. Проаналізовано методи розв'язання задачі та можливі критерії оптимізації, зокрема мінімізацію витрат, часу виконання та балансування навантаження ресурсів.

Дослідження підтвердило, що тривимірна задача призначення ефективно моделює процес розподілу менеджерів, завдань і виконавців, що дозволяє:

- Забезпечити оптимальну відповідність між менеджерами, ІТ проєктами та виконавцями.
- Мінімізувати витрати за рахунок ефективного розподілу навантаження.
- Підвищити продуктивність шляхом оптимального використання кваліфікаційного потенціалу учасників проєкту.
- Скоротити час реалізації ІТ проєктів через узгодження процесів на декількох рівнях прийняття рішень.

Практична значущість підходу полягає у можливості його інтеграції в автоматизовані системи управління проєктами для підтримки прийняття рішень щодо розподілу ресурсів у великих організаціях. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію моделі до динамічних умов управління, коли змінюються вимоги до проєктів або доступність ресурсів.

Отримані результати можуть бути корисними для керівників проєктів, які прагнуть оптимізувати планування та реалізацію завдань, а також для розробників інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у сфері управління ІТ проєктами.

REFERENCES

- [1] Kuhn, H. W. (1955). The Hungarian Method for the Assignment Problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 2(1–2), pp. 83–97.
- [2] Kuhn, H. V. (1956) Variants of the Hungarian method for the assignment problems. *Naval. Res. Logist. Quart.* pp. 253–258
- [3] Burkard, R. E., Dell'Amico, M., & Martello, S. (2009). *Assignment Problems*. SIAM.
- [4] Dell'Amico, M., & Toth, P. (2017). Algorithms for the Generalized Assignment Problem. *Mathematical Programming*, 112(1), pp. 183–212.
- [5] Gavish, B., & Graves, S. C. (1978). The Multi-Resource Multi-Task Assignment Problem. *Management Science*, 24(7), pp. 773–781.
- [6] Çela, E. (2013). *The Quadratic Assignment Problem: Theory and Algorithms*. Springer.
- [7] Pentico, D. W. (2020). Assignment Problems: A Golden Anniversary Survey. *European Journal of Operational Research*, 176(2), pp. 774–793.
- [8] Shen, C., & Wang, L. (2013). Adaptive Resource Allocation Models in Project Management. *Journal of Project Management Science*, 12(3), pp. 215–228.
- [9] Brucker, P., Knust, S., & Thiele, O. (2019). Scheduling and Task Allocation under Uncertainty. *Computers & Operations Research*, 56, pp. 23–38.
- [10] Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2021). Machine Learning-Based Approaches for Project Optimization. *Artificial Intelligence in Project Management*, 5(1), pp. 1–15.
- [11] Hall, P. (1935). On Representatives of Subsets. *Journal of the London Mathematical Society*, 10(1), pp. 26–30.
- [12] Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- [13] Kenneth, H. Rosen. (2002). *Discrete Mathematics and Its Applications*. McGrawHill Science, p. 928.
- [14] Bekh, O. (2014). *Mathematic Programming: Manual*, Lviv: Magnolia. [in Ukrainian].
- [15] Nicherson, D. & Sandier, T. (2004). *Intertemporal Incentive Allocation in Simple Hierarchies*. *Mathematical Social Sciences*, 7(1), pp. 33–57.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kuhn, H. W. (1955). The Hungarian Method for the Assignment Problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 2(1–2), pp. 83–97.
- [2] Kuhn, H. V. (1956) Variants of the Hungarian method for the assignment problems. *Naval. Res. Logist. Quart.* pp. 253–258
- [3] Burkard, R. E., Dell'Amico, M., & Martello, S. (2009). *Assignment Problems*. SIAM.
- [4] Dell'Amico, M., & Toth, P. (2017). Algorithms for the Generalized Assignment Problem. *Mathematical Programming*, 112(1), pp. 183–212.
- [5] Gavish, B., & Graves, S. C. (1978). The Multi-Resource Multi-Task Assignment Problem. *Management Science*, 24(7), pp. 773–781.
- [6] Çela, E. (2013). *The Quadratic Assignment Problem: Theory and Algorithms*. Springer.
- [7] Pentico, D. W. (2020). Assignment Problems: A Golden Anniversary Survey. *European Journal of Operational Research*, 176(2), pp. 774–793.
- [8] Shen, C., & Wang, L. (2013). Adaptive Resource Allocation Models in Project Management. *Journal of Project Management Science*, 12(3), pp. 215–228.
- [9] Brucker, P., Knust, S., & Thiele, O. (2019). Scheduling and Task Allocation under Uncertainty. *Computers & Operations Research*, 56, pp. 23–38.
- [10] Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2021). Machine Learning-Based Approaches for Project Optimization. *Artificial Intelligence in Project Management*, 5(1), pp. 1–15.

- [11] Hall, P. (1935). On Representatives of Subsets. *Journal of the London Mathematical Society*, 10(1), pp. 26–30.
- [12] Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- [13] Kenneth, H. Rosen. (2002). *Discrete Mathematics and Its Applications*. McGrawHill Science, 928 p.
- [14] Bekh, O.(2014). *Mathematic Programming: Manual*, Lviv: Magnolia. [in Ukrainian].
- [15] Nicherson, D. & Sandier, T. (2004). *Intertemporal Incentive Allocation in Simple Hierarchies*. *Mathematical Social Sciences*, 7(1), pp. 33–57.

© Чернова Л. С., Титов С. Д., Журавель І. А., Чернова Л. С., Зубарев А. А., Майстер І. В.
Дата надходження статті до редакції: 12.05.2025
Дата затвердження статті до друку: 25.05.2025