

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



БАБИЧ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 519.7:007:004

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СКЛАДАННЯ РОЗКЛАДУ ЗАНЯТЬ
ЗГІДНО ПЕРМАНЕНТНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ 2023

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Турбал Юрій Васильович,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування МОН України, м. Рівне.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Рак Тарас Євгенович,
професор ІТ-СТЕП Університету, м. Львів;

доктор технічних наук, професор
Комар Мирослав Петрович,
завідувач кафедри інформаційно-обчислювальних систем управління Західноукраїнського національного університету, м. Тернопіль.

Захист відбудеться «7» липня 2023 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 70.052.06 Хмельницького національного університету за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Хмельницького національного університету за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1.

Автореферат розісланий «6» червня 2023 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 70.052.06



К. Ю. Бобровнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Задачі складання розкладів сьогодні не втрачають своєї актуальності, незважаючи на наявність великої кількості теоретичних результатів і практичних підходів до їх вирішення, напрацьованих щонайменше протягом останніх 100 років. І це не дивно, адже проблема складання розкладу – одна з найскладніших задач прикладної математики. Вона характеризується наявністю багатьох критеріїв, вага яких на практиці може бути різною навіть для схожих на перший погляд задач, необхідністю розв'язувати проблему впорядкування значних за розміром дискретних множин, що призводить до виникнення алгоритмів експоненційної складності, відповідні задачі часто є NP-повними. На практиці іноді необхідно враховувати і людський фактор, психолого-педагогічні особливості, що призводить до проблем виключно формалізованої постановки задачі та автоматизації процесу її оптимального вирішення. Тут виникає необхідність у застосуванні експертних оцінок, певних евристичних підходів.

Складність відповідних точних оптимізаційних алгоритмів при розв'язанні задач квадратичного програмування, що часто тут виникають, досліджувалась багатьма вченими. Вона зумовлює широке застосування певних альтернативних підходів, де пропонувалось знаходження близького до оптимального розв'язання за допомогою певних евристичних алгоритмів. Так, наприклад, останніми роками при складанні розкладів занять ЗВО почали широко застосовуватись генетичні алгоритми, які, як відомо, дають розв'язок, близький до оптимального, та вимагають окремого дослідження їх ефективності, збіжності. Розв'язання задач складання розкладів занять, зустрічей вимагає застосування нестандартних методів, оригінального творчого мислення і глибокого розуміння суті й складності проблеми. Але для організацій типу закладів вищої освіти вирішення цієї проблеми вкрай необхідно, оскільки розклад або графік є основним інструментом управління часом, від нього безпосередньо залежить, наприклад, продуктивність праці викладачів і швидкість навченості студентів, а значить і ефективність ЗВО в цілому.

У школі кібернетики та інформатики, котра створена В. М. Глушковым, досягнуто значних результатів у напрямку розвитку новітніх інформаційних технологій, зокрема, розв'язання задач складання розкладів. У цьому контексті можна відзначити, зокрема, роботи В. М. Томашевського, В. С. Моркуна, В. Є. Снитюка, М. Д. Годлевського, С. Д. Штовби. Передумовою побудови відповідних програмних комплексів для автоматизації задач складання розкладів стали роботи Baptiste Philippe, Blazewicz Jacek, Burke Edmund, Peter Brucker, Kendall Graham, Lawler Eugene Leighton (Gene), Leung Joseph Y.T., Werner Frank.

А тому розробка нових підходів у алгоритмізації задач календарного планування та розробка відповідного програмного забезпечення є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проведено у рамках науково-дослідної роботи Національного університету водного господарства та природокористування, зокрема наукової теми «Методи ідентифікації параметрів та математичні моделі, що ґрунтуються на базі багатоканальних систем масового обслуговування», номер держреєстрації № 0114U0011181, де здобувачу належить реалізація окремих алгоритмів для

моделювання багатоканальних систем масового обслуговування та оптимізації кількості обслуговуючих пристроїв.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності інформаційних технологій формування розкладів, в основу яких покладено методи перманентної декомпозиції.

Задачі дослідження:

1. Дослідити сучасні методи та інформаційні технології складання розкладів занять у закладах освіти.

2. Розробити нові критерії для перевірки допустимості матриць розкладів та можливості оптимізації їх структури в межах конфігураційного підходу, що дозволить вдосконалити існуючі процедури аналізу даних у програмних комплексах для автоматизованого створення розкладів.

3. Дослідити можливість створення нових ефективних методів генерації комбінаторних об'єктів, в основу яких покладено процедуру перманентної декомпозиції.

4. Модифікувати класичні визначення перманент та матриць інцидентності систем різних представників множин так, щоб вони враховували наявність потоків у матрицях розкладів.

5. Розробити нові підходи до розв'язання задач складання розкладів у межах перманентного підходу на основі систем різних представників конфігурацій шляхом використання спеціальних адитивно-диз'юнктивних форм.

6. Розробити інформаційну технологію для формування розкладів, що максимально враховує інтереси усіх стейкхолдерів.

Об'єктом дослідження є процеси складання розкладу занять з використанням перманентного підходу.

Предметом дослідження є моделі, методи та засоби інформаційної технології складання розкладу занять з використанням перманентного підходу.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої у дисертаційній роботі мети використані методи системного та порівняльного аналізу для обґрунтування актуальності та постановки наукового завдання; теоретико-множинні підходи при розробці алгоритмів формування матриць розкладів на основі систем різних представників конфігурацій; методи формальних алгебр при розробці концепції адитивно-диз'юнктивних форм; апарат модельно-орієнтованих підходів та методи формування ієрархічних систем у процесі розробки програмного комплексу з використанням мови програмування C++.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше розроблено критеріальний метод перевірки допустимості матриць розкладів, який, на відміну від відомих методів, враховує конфігурації матриць, що дає змогу здійснити аналіз коректності вхідних даних.

2. Вперше розроблено метод перманентної декомпозиції, який відрізняється від відомих тим, що здійснює генерацію комбінаторних об'єктів згідно модифікованих перманент матриць інцидентності та дає змогу покращити процеси генерації матриць розкладів.

3. Вперше розроблено метод складання розкладу згідно адитивно-диз'юнктивних форм, який відрізняється від відомих методів використанням операцій вибору та включення і дає змогу створювати засоби, які на основі систем

різних представників множин, що утворюються стовпцями матриць розкладів, генерують усі варіанти матриць розкладів у відповідності до заданих додаткових вимог.

4. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія складання розкладів за принципами перманентної декомпозиції, яка дає змогу генерувати розклади з врахуванням заданих критеріїв та вимог стейкхолдерів, яка, на відміну від відомих ІТ, враховує пріоритети вимог стейкхолдерів.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані у роботі алгоритми формування комбінаторних об'єктів на основі модифікованих перманент матриць інцидентності дозволили удосконалити сучасне інформаційне забезпечення для задач складання розкладів занять у закладах вищої освіти. Методи, представлені в дисертаційному дослідженні, реалізовано у відповідному програмному комплексі для формування розкладу занять. Відповідне програмне забезпечення було апробовано у Рівненському державному гуманітарному університеті на факультеті математики та інформатики. Результати роботи впроваджено у навчальний процес Національного університету водного господарства та природокористування, Рівненського фахового коледжу при Національному університеті біоресурсів та природокористування (акт впровадження від 12.12.2022 р.), у Рівненській обласній лікарні для складання графіків консультацій лікарів (акт впровадження від 12.12.2022 р.), а також у ТОВ «СМАРТ КІНГ ЛТД» для складання розкладів scgm-зустрічей працівників компанії (акт впровадження від 12.04.2023 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи сформульовані та отримані автором самостійно. У наведених працях, опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать: декілька нових підходів та алгоритмів до формування допустимої матриці розкладів [1], запропоновано узагальнення методу перманентної декомпозиції на більш ширший клас задач генерації комбінаторних об'єктів [2; 3], здійснено оцінку складності алгоритмів у термінах О-оцінювання, здійснено дослідження допустимості матриць розкладів для різних варіантів конфігурацій [4], запропоновано новий підхід до алгоритмічної реалізації процесу формування різних представників стовпців матриці розкладів [5], запропоновано структури даних та здійснено програмну реалізацію процесу перманентної декомпозиції [6], запропоновано метод формування матриць розкладів на основі певних модифікацій перманент [7], реалізовано концепцію адитивно-диз'юнктивних форм у алгоритмах формування розкладів на основі систем різних представників [10], уточнено алгоритм формування матриці розкладів у задачах календарного планування [11], реалізовано алгоритми «витіснень» для формування матриць розкладів [12], запропоновано та реалізовано програмно алгоритми оптимізації матриць розкладу за базовими критеріями у межах конфігураційного підходу [12; 13], узагальнено концепцію адитивно-диз'юнктивних форм та визначено класи задач з можливим їх застосуванням [9; 8].

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використані результати особистих досліджень здобувача.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на конференціях: «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» – матеріали Всеукраїнської наукової конференції, м. Рівне, 2015 р.; «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики

(APAMCS-2015)» – матеріали міжнародної конференції, Львів, 24–25 вересня, 2015 р.; «Intel ITSIS' 2021: 2nd International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security», March 24–26, 2021, Khmelnytskyi; Computational & Information Technologies for Control & Modeling (CITCM), 2021, Rivne; «Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2015)», XXVI Int. Conference, Shidnitsa, Ukraine, May 11–15 – 2014; «Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2015)»: XXVII Int. Conference, Odesa, Ukraine, August, 23–28 – 2015.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 13 працях, зокрема: сім статей [2–8] у наукових фахових періодичних виданнях України, з яких одна стаття [2, Web of Science] в журналі категорії А, шість статей в журналах категорії Б; одна стаття [1, Index Copernicus] у періодичному науковому виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку Європейського Союзу; чотири публікації [9–13] у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-технічних конференцій, з них дві роботи включені до міжнародної наукометричної бази Scopus [7; 8].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 158 найменувань та додатків. Повний обсяг дисертації складає 194 сторінки, основний зміст викладено на 160 сторінках, де наведено 34 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність, вказується на зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, формулюються мета та задачі, визначається об'єкт й предмет досліджень; також наводиться наукова новизна та практичні значення отриманих результатів, надана інформація щодо апробації одержаних результатів, публікації за темою дисертаційної роботи та зазначається особистий внесок здобувача.

У **першому розділі «Огляд відомих підходів, методів та алгоритмів до розв'язання задач складання розкладів»** проведено аналіз стану проблеми складання розкладу занять в закладах освіти. Публікації з проблеми автоматизованої генерації розкладу занять ЗВО можна поділити на декілька категорій, які стосуються, зокрема, формалізації предметної області, аналізу існуючих та розробки нових алгоритмів та методів складання розкладу, розробки нових програмних засобів генерації розкладів. Побудувати єдину класифікацію методів складання навчального розкладу досить складно, однак виділяються окремі групи методів за певними класифікаційними ознаками: методи комбінаторної оптимізації, декомпозиційні методи, методи евристичного пошуку, метаевристичні методи.

Методи комбінаторної оптимізації, зокрема, алгоритми перебору, метод гілок та границь, не здатні за прийнятний час вирішувати існуючі завдання складання оптимального навчального розкладу великої розмірності без використання евристик та застосування декомпозиції вихідного завдання. Якщо ж евристики або декомпозиція вихідної задачі використовується, то ускладнюється доказ повноти методу. Метод евристичного пошуку, на відміну від розглянутих вище методів, в основному є неповними, хоча існують і винятки.

До групи метаевристичних методів відносяться, зокрема, методи локального пошуку, що включають пошук із заборонами і стохастичний пошук, метод імітації відпалу, генетичні чи еволюційні алгоритми, метод мурашиних колоній тощо. Основною особливістю даної групи методів є можливість отримання кількох оптимальних чи суб-оптимальних рішень та використання «чорнових» рішень на початку пошуку. Пошук оптимального рішення здійснюється шляхом послідовного покращення кожного з попередніх рішень. Як правило, у таких алгоритмах передбачається можливість виходу в процесі оптимізації з точок локальних мінімумів оптимізованої функції. Ці алгоритми пошуку можуть забезпечувати високоякісні рішення, але часто мають значну обчислювальну вартість. Класичні ж методи здебільшого використовують ітераційну техніку неперервної оптимізації, тому можливе зациклення в локальному оптимумі.

У розділі також проведено аналіз більше 200 сучасних інформаційних систем для складання розкладів занять, що наявні на українському та міжнародному ринках програмного забезпечення. Окремими параметрами класифікації по складності інформаційних систем можемо визначити такі: параметри «глибоке календарне планування» (SM+), що є демонстрацією більш складних процесів task scheduling в інформаційній системі та параметр «просте календарне планування» (SM(b)), що є прикладом простих процесів task scheduling в інформаційній системі (побудова простих розкладів, що не являються NP-повною задачею). Аналіз методів інформаційних технологій, які використовуються сьогодні для складання розкладів, показує, що кожен з них має свою оптимальну сферу застосування та має певні недоліки, що вказує на необхідність пошуку подальшого вдосконалення існуючих методів та розробки нових.

У другому розділі **«Основи ІТ складання розкладів та метод застосування критеріїв для перевірки допустимості матриць розкладів»** запропоновано загальну структуру ІТ складання розкладів та критеріальний метод аналізу вхідних даних. В основі критеріального методу покладено поняття матриці розкладу, що являє собою матрицю ідентифікаторів викладачів, які проводять заняття у відповідних групах (стовпчики матриці відповідають групам, рядки матриці відповідають парам таблиці розкладу). Відповідно, можна розглядати матриці денного, тижневого, місячного розкладу тощо. При цьому на даному етапі не використовується інформація про аудиторний фонд. Структура матриці розкладу розглядається з точки зору бінарних, унарних та тернарних конфігурацій. Тернарною конфігурацією розкладу, утвореною елементом матриці розкладу d , називається множина елементів $\{a_{ij}, a_{kl}, a_{mp}\}$ матриці розкладу R , таких, що $a_{ij} = a_{kl} = a_{mp} = d$, $i, k, m \in \{1, 2, 3\}, 1 \leq j, l, p \leq n$. Аналогічно можемо ввести поняття бінарних та унарних конфігурацій (бінарна конфігурація не може бути елементом тернарної).

В розділі сформульовано та доведено низку властивостей та критеріїв, які дозволяють за конфігураційною структурою матриці розкладу визначити, чи можна на основі вихідної побудувати таку матрицю розкладів, що задовольняє певні додаткові умови (наприклад, відсутність «вікон» у розкладі для викладачів чи студентів – умови K_1 та K_2 відповідно). Зокрема, показано, що:

- Система різних представників стовпців матриці розкладу існує тоді і тільки

тоді, коли перманент матриці інцидентності відмінний від нуля.

– Матриця розкладу, що складається лише з тернарних конфігурацій, завжди може бути перетворена шляхом перестановок елементів стовпчиків так, що задовольнятиме умову K_1 .

– Матриця розкладу, що складається лише з бінарних конфігурацій, не може бути перетворена шляхом перестановок елементів стовпчиків так, щоб задовольнялась умова K_1 .

– Матриця розкладу може бути перетворена шляхом перестановок елементів стовпчиків так, щоб задовольнялась умова K_1 тільки тоді, коли не існує такої підсистеми векторів-стовпців, для якої виконується умова: $k_{bin} > k_{st} - k_{ter}$, де k_{bin} – кількість бінарних конфігурацій у підсистемі, k_{st} – кількість стовпців підсистеми, k_{ter} – кількість тернарних конфігурацій підсистеми.

– Матриця розкладу, що задовольняє умову K_1 та містить лише тернарні конфігурації та нулі, може бути перетворена так, щоб задовольнялась умова K_2 тоді і тільки тоді, коли немає замкнутої підсистеми стовпців, для якої кількість елементів множини $\tilde{\Psi}_1$ більша за кількість елементів множини Ψ_2 .



Рисунок 1 – Схема застосування інформаційної технології складання розкладів згідно перманентної декомпозиції

Властивість 2.6. Матриця розкладу, що задовольняє умову K_1 та містить лише бінарні конфігурації та нулі, завжди може бути перетворена шляхом перестановок елементів стовпчиків так, щоб задовольнялась умова K_2 . Довільна матриця розкладу, що задовольняє умову K_1 може бути перетворена так, щоб задовольнялась умова K_2 тоді і тільки тоді, коли немає замкнутої підсистеми стовпців, для якої кількість елементів множини $\tilde{\Psi}_1$ більша за кількість елементів множини $\Psi_2 \cup \Psi_3$. Тут $\tilde{\Psi}_1$ – множина стовпців матриці розкладу, які містять нуль у другому рядку та рівно два ненульових елементи – представники бінарних чи

тернарних конфігурацій, Ψ_2 – множина стовпців матриці розкладу, які не містять нуль у другому рядку та містять рівно два нульових елементи, Ψ_3 – множина стовпців матриці, що містять унарну конфігурацію у першому чи третьому рядку і представника бінарної чи тернарної у другому. Застосування критеріального методу разом із методами генерації матриць розкладів, для яких середнє значення відстані (кількості ітерацій) від ітерації, де спрацювали відповідні критерії до ітерації, яка дозволяє безпосередньо отримати відповідну форму матриці розкладів, у середньому рівна половині пройдених ітерацій, дозволяє зменшити трудомісткість таких методів генерації на 50%. Запропоновано також відповідні алгоритми перетворень матриць розкладів, які забезпечують виконання відповідних умов.

Алгоритм η_1 (алгоритм «активних елементів») застосовується для побудови матриці розкладу, що відповідає умові K_1 . Основні етапи алгоритму:

1. Здійснюється пошук бінарної конфігурації, що не задовольняє умову K_1 . Якщо таких конфігурацій немає, кінець алгоритму.
2. Робиться «активним» довільний елемент бінарної конфігурації, що не задовольняє умову K_1 .
3. Здійснюється перестановка «активного» елемента та елемента другого рядка цього ж стовпчика, «активний» елемент перестає бути «активним».
4. Розглядається елемент a , що став на місце «активного» на попередньому кроці. При цьому виникає дві ситуації.
5. Якщо a співпадає з певним елементом у рядку, то останній стає «активним». Якщо ж в процесі останньої перестановки бінарна конфігурація по a «розірвалася», то активним стає елемент «розірваної» конфігурації, що не брав участі в останній перестановці. Здійснюється перехід до кроку 3.
6. Якщо описаних вище ситуацій не виникає, то здійснюється перехід до кроку 1.
7. Алгоритм закінчує роботу, якщо неоптимізованих бінарних конфігурацій не залишилось.

8. Алгоритм η_2 (алгоритмом «витіснень») застосовується для забезпечення виконання умови K_2 матрицею розкладу, що задовольняє умову K_1 .

У третьому розділі «Метод перманентної декомпозиції та метод, що ґрунтується на основі алгебри адитивно-диз'юнктивних форм в задачах складання розкладів» запропоновано застосування методу перманентної декомпозиції для побудови усіх можливих систем різних представників стовпців матриці розкладів (СРПС), а також спеціальну алгебру адитивно-диз'юнктивних форм для побудови на основі СРПС усіх коректних варіантів розкладів, що задовольняють відповідні додаткові умови. Структура ІТ на основі методу перманентної декомпозиції зображена на рисунку 2. Суть методу перманентної декомпозиції полягає у тому, що до процедури розкладу модифікованого перманента за рядком з метою обчислення самого значення перманента додається процедура запам'ятовування ідентифікаторів стовпців матриці інцидентності.

Модифікованим перманентом матриці інцидентності називається сума всіх можливих добуток елементів матриці, кожен з яких містить по одному елементу з кожного рядка та з різних стовпців, причому елемент потокового стовпця (стовпця, що відповідає потоковому елементу) не може бути в добутку разом з елементами інших рядків, що відповідають цьому ж потоку.



Рисунок 2 – Структура інформаційної технології складання розкладів згідно перманентної декомпозиції

Матриця інцидентності будується на основі матриці розкладу наступним способом. По горизонталі зображуються ідентифікатори викладачів, по вертикалі – групи, у яких проводяться заняття. Кожному викладачу ставиться у відповідність стовпчик матриці, у якому записуються нулі та одинички в залежності від того, чи має викладач пари у відповідних групах.

Причому, якщо якийсь викладач x має «поточну пару», то виділяється окремий стовпчик матриці інцидентності з ідентифікатором x^p . Таким чином, утворюється матриця виду:

$$A = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix},$$

де

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{коли } x_i \in R_j, \\ 0 & \text{в інакшому випадку.} \end{cases}$$

Матриця інцидентності допускає узагальнення. Якщо є n різних елементів (a_1, a_2, \dots, a_n) , що утворюють множини (W_1, W_2, \dots, W_m) , причому елементи можуть у множинах повторюватись, то інформацію про те, які елементи утворюють кожен з множин, зручно записати у вигляді матриці інцидентності виду:

$$\begin{pmatrix} & a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ W_1 & n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ W_2 & n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_m & n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{pmatrix},$$

де n_{ij} – кількість елементів a_j у множині W_i . Якщо розглянути матрицю розкладів і врахувати наявність потоків, то в матриці інцидентності для поточних елементів виділяються окремі стовпчики.

Процедуру розкладу можна проілюструвати на наступному прикладі:

$$\begin{aligned} \text{per mod} \begin{pmatrix} 1 & 1^n & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &= 1_1^{1^p} * 1 + 1_1^2 * \text{per mod} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 1_1^3 * \\ \text{per mod} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} &= 1_1^{1^n} * 1 + 1_1^2 * (1_2^1 \text{ per mod} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} + 1_2^3 \text{ per mod} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}) \\ &+ \dots + \\ 1_1^3 1_2^1 \text{ per mod} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} &= 1_1^{1^n} + 1_1^2 1_2^1 1_3^4 + 1_1^2 1_2^3 1_3^1 + 1_1^2 1_2^3 1_3^4 + 1_1^3 1_2^1 1_3^4. \end{aligned}$$

Тут модифікований перманент рівний 5 (і це є кількість всіх можливих СРПС), крім того, відомі й самі СРПС. Вони записуються як верхні індекси «одиничок». Причому, якщо певні нижні індекси відсутні, то відповідну кількість разів повторюється верхній елемент (ситуація потокового елемента): 111, 214, 231, 234, 314.

В основі інформаційної технології, що пропонується у даному розділі, покладено поняття системи різних представників множин, утворених елементами стовпців матриці розкладу (СРПС), особливі способи представлення вхідної інформації на основі алгебраїчних структур – спеціальних матриць інцидентності (без використання додаткових баз даних), а також алгоритми генерації СРПС, що ґрунтуються на процедурах декомпозиції спеціальним чином модифікованих перманент матриць інцидентності.

Особливістю інформаційної технології є те, що матриці інцидентності вже містять у собі додаткові обмеження, наприклад, інформацію про потоки, а алгоритми знаходження їх модифікованих перманент дозволяють побудувати конструктивні способи запису у пам'ять відповідних СРПС. Таким чином, окремі проблеми тут вирішуються автоматично лише за рахунок відповідної організації структур даних, як, наприклад, проблема «потоків», що дозволяє уникнути громіздких додаткових обчислювальних процедур. Метод перманентної декомпозиції адаптований до роботи в «парі» з відповідною матрицею інцидентності. В той же час, алгоритм розкладу перманента дозволяє безпосередньо здійснювати запис у потрібну комірку пам'яті необхідного значення, що дозволяє

зеконмити навіть на пошуку позиції в структурах даних для запису елемента – адреса тут генерується безпосередньо у процесі рекурентної процедури декомпозиції.

Складність методу перманентної декомпозиції порівнюється з класом методів, що ґрунтуються на відношеннях порядку. Теоретично показано, що для задачі генерації перестановок метод перманентної декомпозиції належить до того самого класу складності – $O(n!)$, що і метод, який базується на відношенні порядку, кількість арифметичних операцій відповідного алгоритму рівна $n!(e + 1) - 1$. Якщо застосувати метод генерації, що ґрунтується на відношеннях порядку, то теоретично можна отримати оцінки виграшу методу перманентної декомпозиції порядку принаймні на 46%. Для побудови розкладів на основі СРПС у процесі перманентної декомпозиції вводиться дві операції: операція вибору \vee (диз'юнктивна операція) та операція обов'язкового включення $+$ (адитивна операція). Для коректної побудови алгебри, що містить операції включення та вибору, введемо формальне визначення розкладу. Розкладом будемо називати довільний вектор, елементами якого є СРП. Розклад

$$R = ((v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1m}), (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}), \dots, (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km}))$$

називається коректним, якщо виконуються умови:

$$1. \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}: \{v_{1j} \cup v_{2j} \cup \dots \cup v_{kj}\} = \{n_{j1} * a_1 \cup n_{j2} * a_2 \cup \dots \cup n_{jn} * a_n\},$$

$$l * a = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}, a_i = a, i = \overline{1, l}.$$

$$2. \forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: v_{ij} \neq v_{ir}, j \neq r, \text{ якщо } v_{ij}, v_{ir} \text{ є непотоковими елементами.}$$

3 використанням операції включення розклад можемо записати як «суму» СРП:

$$R = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1m}) + (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}) + \dots + (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km})$$

та дати його визначення через операцію включення.

Складність методу перманентної декомпозиції порівнюється з класом методів, що ґрунтуються на відношеннях порядку. Теоретично показано, що для задачі генерації перестановок метод перманентної декомпозиції належить до того самого класу складності – $O(n!)$, що і метод, який базується на відношенні порядку, кількість арифметичних операцій відповідного алгоритму рівна $n!(e + 1) - 1$.

Якщо застосувати метод генерації, що ґрунтується на відношеннях порядку, то теоретично можна отримати оцінки виграшу методу перманентної декомпозиції принаймні на 46%. Для побудови розкладів на основі СРПС у процесі перманентної декомпозиції вводиться дві операції: операція вибору \vee (диз'юнктивна операція) та операція обов'язкового включення $+$ (адитивна операція).

Для коректної побудови алгебри, що містить операції включення та вибору, введемо формальне визначення розкладу. Розкладом будемо називати довільний вектор, елементами якого є СРП. Розклад

$$R = ((v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1m}), (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}), \dots, (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km}))$$

називається коректним, якщо виконуються умови:

$$1. \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}: \{v_{1j} \cup v_{2j} \cup \dots \cup v_{kj}\} = \{n_{j1} * a_1 \cup n_{j2} * a_2 \cup \dots \cup n_{jn} * a_n\},$$

$$l * a = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}, a_i = a, i = \overline{1, l}.$$

$$2. \forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: v_{ij} \neq v_{ir}, j \neq r, \text{ якщо } v_{ij}, v_{ir} \text{ є непотоковими елементами.}$$

3 використанням операції включення розклад можемо записати як «суму» СРП:

$$R = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1m}) + (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}) + \dots + (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{km})$$

та дати його визначення через операцію включення.

Адитивно-диз'юнктивною формою називається довільний вираз, що може містити розклади, які коректно поєднані бінарними адитивною чи диз'юнктивною операціями та дужки, які змінюють порядок виконання операцій.

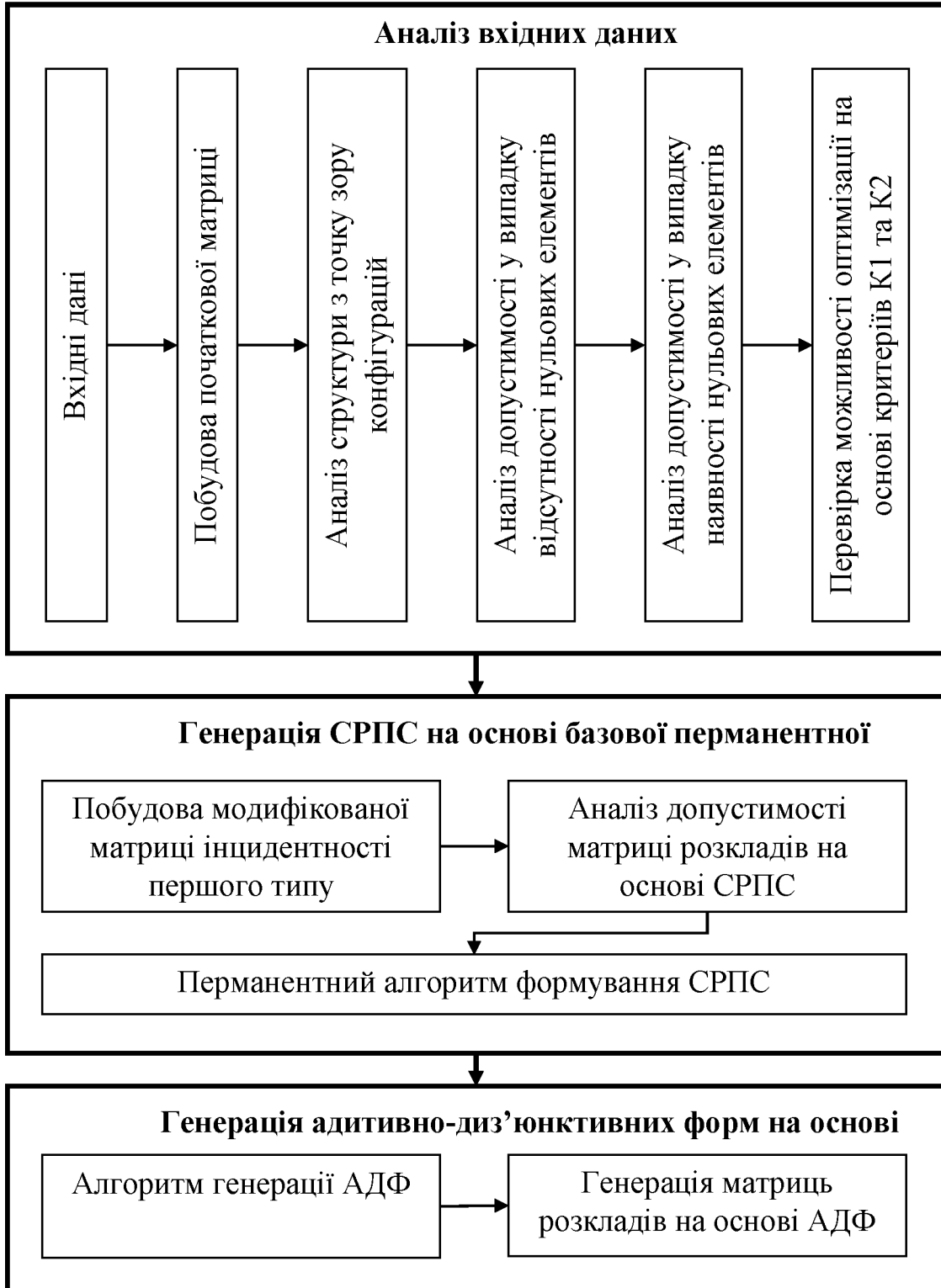


Рисунок 3 – Структура інформаційної технології складання розкладів згідно перманентної декомпозиції з використанням АДФ (варіант використання базового перманентного підходу)

За аналогією з булевою алгеброю, елементарною адитивною формою називається сума СРП, елементарною диз'юнктивною формою називається диз'юнкція СРП. Канонічною АДФ будемо називається диз'юнкція розкладів. Нехай $a, b \in A$ – адитивно-диз'юнктивні форми. Тоді мають місце такі властивості:

1. $a \vee a = a$.
2. $a \vee b = b \vee a$
3. $a + b \neq b + a$, a, b – різні.
4. $a + a \in A$
5. $a + b \vee c = (a + b) \vee (a + c)$

Процедура розкладу перманента може бути модифікована так, щоб результатом розкладу була АДФ. Так вирішується проблема остаточної генерації розкладу на основі системи. Процес побудови розкладу включає два етапи:

– Друга модифікація матриці інцидентності, яка дає вичерпну інформацію про кількість пар.

– Модифікація процедури декомпозиції перманента з точки зору структур даних, в якій враховуються операції алгебри АДФ.

Результатом такої процедури є не просто список СРПС, а адитивно-диз'юнктивна форма, яка дозволяє вже безпосередньо генерувати варіанти остаточної матриць розкладів (операція диз'юнкції призводить до різних варіантів розкладу, а операція обов'язкового включення дозволяє формувати один конкретний варіант).

У четвертому розділі «Інформаційна система та деякі особливості програмної реалізації. Експериментальне дослідження базових алгоритмів» розглядається приклад інформаційної системи, що була реалізована у Рівненському державному гуманітарному університеті на факультеті математики та інформатики. Особливістю цієї системи є врахування низки додаткових вимог та їх пріоритезація.

Розглядається специфіка структур даних та реалізація основних функцій.

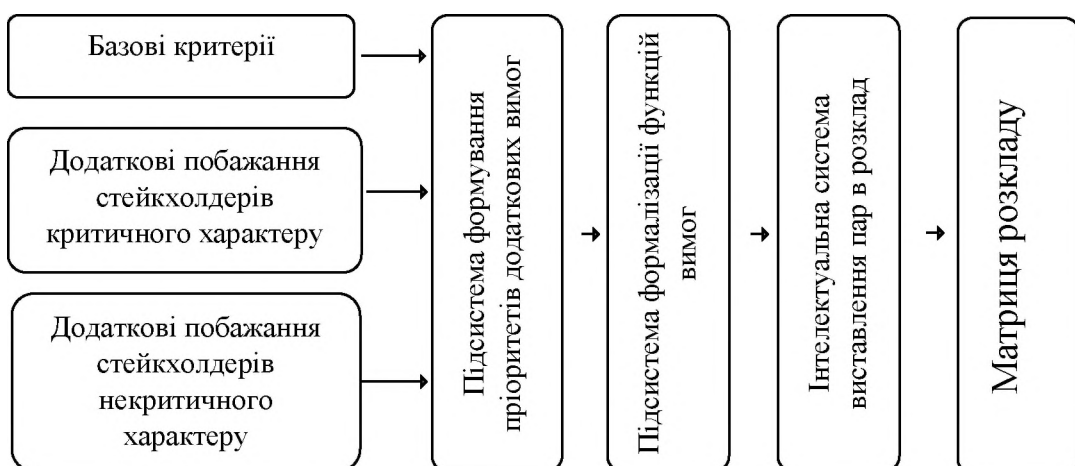


Рисунок 4 – Загальна структура інформаційної технології складання розкладів згідно перманентної декомпозиції, що враховує побажання стейкхолдерів

У процесі експериментальних досліджень було вибрано набір тестових задач, зокрема, генерації перестановок послідовностей елементів різної довжини. На сьогодні опубліковано експериментальні результати дослідження відомих методів, таких як висхідний алгоритм, лексикографічний алгоритм, Неар-алгоритм та

алгоритм Штайнмайера-Джонсона-Троттера, які показують, що на практиці суттєві переваги має саме алгоритм Штайнмайера-Джонсона-Троттера. При цьому теоретичний аналіз кількості арифметичних операцій показує, що всі ці алгоритми належать до одного і того ж класу складності ($O(n!)$). А тому для порівняння з методом перманентної декомпозиції звернемо увагу саме на алгоритм Штайнмайера-Джонсона-Троттера. Для тестування було використано OnlineGDB C++ компілятор. Результати порівняння наведено в таблиці 1. Як бачимо, метод перманентної декомпозиції за швидкістю майже однаковий з найшвидшим методом Штайнмайера-Джонсона-Троттера. При цьому Heap-алгоритм значно поступається згаданим методам.

Таблиця 1. Результати тестування оглянутих методів

Test Case	Input Length	Метод перманентної декомпозиції	Метод Джонсона - Троттера	Heap - алгоритм
1	7	433 ms	776 ms	1236 ms
2	8	4.591 s	5.683 s	13.713 s
3	9	54.440 s	52.015 s	101.562 s

Шляхом узагальнень результатів усіх попередніх розділів вперше сформульовано інформаційну технологію для розв'язання задачі генерації розкладів, що являє собою цілісну систему, яка поєднує низку підходів, зокрема конфігураційного підходу до аналізу вхідних даних та алгоритмів формування початкових допустимих матриць розкладів, перманентного підходу генерації СРПС та застосування алгоритмів перманентної декомпозиції, лексикографічного підходу на основі відповідних відношень порядку, алгебри адитивно-диз'юнктивних форм. Підхід, що пропонується, дуже зручний з точки зору програмної реалізації та побудови відповідної ієрархії класів. Він дозволяє власне створити інформаційну технологію як цілісну систему, що поєднує відповідні алгоритми та методи.

Вперше запропоновано інформаційну технологію складання розкладу занять, яка максимально враховує інтереси стейкхолдерів. Запропоновано власну систему кодування для представлення вхідних даних, яка оптимізована з точки зору ресурсів пам'яті – усі дані кодуються на бітовому рівні в межах цілих чисел. Така система представлення даних зумовлює використання побітових операцій у всіх реалізованих функціях. Проведено експерименти, що підтверджують ефективність інформаційної технології генерації матриць розкладів. Зокрема, матриця розкладу, що була згенерована у тестових прикладах (факультет математики та інформатики РДГУ) була проаналізована з використанням критерію якості (2.2) та отримано числову оцінку ефективності рівну 0,994. Отримана оцінка свідчить про високу ефективність алгоритму генерації, зокрема, з використанням критеріїв відсутності «вікон» у викладачів та студентів.

Експериментально досліджувався метод перманентної декомпозиції для задач генерації комбінаторних об'єктів. Зокрема, для тестових задач генерації перестановок метод перманентної декомпозиції показав практично однакові результати з методом Штайнмайера-Джонсона-Троттера, який на сьогодні вважається одним з найефективніших та є майже втричі швидшим у порівнянні з

існуючими методами, такими як метод генерації на основі лексикографічного порядку чи Неар-алгоритм.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання, яке полягає у покращенні ефективності технологій складання розкладів шляхом розробки інформаційної технології, в основі якої покладено методи перманентної декомпозиції. У результаті виконання роботи:

1. Введено поняття конфігурацій у матрицях розкладів та розроблено нові алгоритми, що дозволяють здійснити оптимізацію матриць розкладів, які мають спеціальну структуру, зокрема, складаються лише з тернарних, бінарних конфігурацій та їх комбінацій, можуть містити «нульові» елементи. Побудовано формальні критерії можливості оптимізації матриць розкладів за певними класами вимог, що має важливе значення для процедур аналізу вхідних даних при використанні широкого класу алгоритмів генерації розкладів та дозволяє покращити обчислювальну складність на 50%.

2. Запропоновано алгоритм формування модифікованої матриці інцидентності та визначення модифікованого перманента, що дає можливість побудувати ефективний алгоритм декомпозиції та алгоритм формування систем різних представників стовпців.

Відповідний алгоритм декомпозиції із «запам'ятовуванням» може бути використаний для розв'язання широкого класу задач генерації комбінаторних об'єктів. Застосування такого підходу дозволяє побудувати узагальнений алгоритм для генерації різнотипних комбінаторні об'єктів – від найпростіших перестановок до складних систем різних представників матриць розкладів. У роботі здійснено оцінку складності відповідних алгоритмів, зокрема, генерації перестановок на основі перманент і показано, що клас складності алгоритму $O(n!)$, що аналогічна відомим алгоритмами, зокрема, методу лексикографічно впорядкованого перебору. Теоретично показано, що складність перманентного алгоритму генерації перестановок на 46% менша складності алгоритму, що базується на відношенні порядку. Практичні експерименти підтвердили ефективність методу перманентної декомпозиції, зокрема, для задачі генерації перестановок метод показав час роботи, що практично однаковий з методом Штайнмайера-Джонсона-Троттера та у кілька разів кращий за Неар-алгоритм.

3. Запропоновано спеціальну алгебру адитивно-диз'юнктивних форм (АДФ), що містить дві операції – диз'юнкції та обов'язкового включення (додавання) та відрізняється алгоритмічним характером її операцій. Операція диз'юнкції означає вибір i , відповідно, дублювання відповідних списків, що містять диз'юнктивні форми, у процесі роботи рекурсивних процедур генерації. Операція обов'язкового включення означає просте включення відповідної СРПС як наступного рядка в біжучу матрицю розкладу.

На основі АДФ запропоновано алгоритми формування матриць розкладів, що дозволяють формувати матриці розкладу безпосередньо у процесі декомпозиції перманента модифікованої матриці інцидентності або утворювати АДФ на основі СМПР, що сформована як результат базового методу перманентної декомпозиції.

4. Розроблено інформаційну технологію для розв'язання задач генерації

розкладів, що являє собою цілісну систему, яка поєднує низку підходів, зокрема конфігураційного підходу до аналізу вхідних даних та алгоритмів формування початкових допустимих матриць розкладів, перманентного підходу генерації СРПС та застосування алгоритмів перманентної декомпозиції, лексикографічного підходу на основі відповідних відношень порядку, алгебри адитивно-диз'юнктивних форм та відрізняється максимальним врахуванням інтересів стейкхолдерів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:

1. Turbal Y. V., Babych S. V. Methods of the schedule matrix forming based on the modified permanent. *Telekomunikacja i Elektronika. Zeszyty Naukowe. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy Im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy*. 2018. Vol. 268, No. 21. Pp. 85–92.

Статті у періодичних фахових наукових виданнях України:

2. Turbal Y. V., Babych S. V., Kunanets N. E. Permanent Decomposition Algorithm for the combinatorial object's generation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. Vol. 2. Pp. 74–79. (Фахове видання України, WoS, категорія А).

3. Бабич С. В. Алгоритм побудови допустимої матриці розкладів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки*. 2014. Вип. 4, ч. 68. С. 274–281.

4. Бабич С. В. Активне навчання студентів у проектній формі. Управління проектами. Порівняння проектного та операційного підходів. *Вісник НУВГП. Сер. Технології навчання*. 2015. Вип. 14. С. 88–94.

5. Бабич С. В., Турбал Ю. В. Методи формування матриць розкладів на основі модифікованих перманент. *Інформаційні системи та мережі*. 2017. Вип. 872. С. 204–209.

6. Бабич С. В., Турбал Ю. В. Програмне забезпечення задач календарного планування на основі конфігураційних підходів. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2022. Вип. 2, ч. 98. С. 258–267.

7. Бабич С. В. Інформаційна технологія генерації матриць розкладів згідно перманентної декомпозиції. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Міжнародний науково-технічний журнал. 2022. Вип. 4. С. 120–127. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-17>.

8. Turbal Y. V., Babych S. V. Information technology for the schedule generation based on the algebra of additive–disjunctive forms and the modified method of permanent decomposition. *Computer systems and information technologies*. 2022. Vol. 4, No. 9. Pp. 120–127. URL: <https://doi.org/10.31891/CSIT>.

Публікації у матеріалах конференцій:

9. Turbal Y. V., Babych S. V., Bachyshyna L., Kunanets N. E. and Kovalchuk N. Modification of the Permanent Decomposition Method for the Meeting Schedule Problem. *The 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP–2021)*. Ternopil, Ukraine, 2021. Pp. 126–131. (Scopus).

10. Turbal Y.V., Babych S.V., Kunanets N. E., Melnyk L. and Pasichnyk V. “Permanent” algorithm for the meeting shedule problem: *IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2021. Pp. 355–359. (Scopus).

11. Бабич С. В., Турбал Ю. В. Алгоритм формування матриці розкладів в задачах календарного планування. *Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів* : матеріали Всеукраїнської наукової конференції. Рівне, Україна, 2015. С. 6.

12. Бабич С. В., Турбал Ю. В. Алгоритми оптимізації матриць розкладу за базовими критеріями в межах конфігураційного підходу: *XXIV International conference PDMU*. Skhidnytsia, Ukraine, 2014. Pp. 97–98.

13. Бабич С. В., Турбал Ю. В. Алгоритм побудови допустимої матриці розкладів. *XXV International conference PDMU*. Odesa, Ukraine, 2015. Pp. 60–61.

АНОТАЦІЯ

Бабич С. В. Інформаційна технологія складання розкладу занять згідно перманентної декомпозиції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю *05.13.06 – інформаційні технології*. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2023.

Зміст анотації. У дисертаційній роботі розв’язана актуальна науково-прикладна задача формування матриць розкладів на основі перманентного підходу із застосуванням спеціальних адитивно-диз’юнктивних форм, яка дозволяє вдосконалити процеси автоматизації трудомістких задач формування розкладів, зокрема розкладів занять закладів вищої освіти, з врахуванням низки додаткових критеріїв.

Об’єктом дослідження є процеси складання розкладу занять з використанням перманентного підходу.

Предметом дослідження є моделі, методи та засоби інформаційної технології складання оптимального розкладу занять із використанням перманентного підходу.

У роботі виконано аналіз відомих підходів, методів, інформаційних технологій, інструментів для розв’язання задач календарного планування.

Наявність великої різноманітності відомих підходів зумовлена значною обчислювальною складністю відповідних задач, зокрема, задача складання розкладу занять є багатокритеріальною та NP-повною. А тому для розв’язання таких задач широко використовуються евристичні підходи, експертні оцінки, генетичні алгоритми поряд із оптимізаційними методами та комбінаторними алгоритмами, які мають точні оцінки обчислювальної складності.

Актуальність таких задач зумовлюється ще й тим, що на практиці вони часто мають низку специфічних вимог, що суттєво впливають на алгоритмічну реалізацію та вибір методу їх розв’язання. Критерії, що виникають при складанні розкладів, часто є антагоністичними і вимагають певних компромісних рішень. Задачі автоматизованої генерації розкладів мають значну обчислювальну складність. А тому розробка нових підходів та алгоритмів до розв’язання задач складання

розкладів і сьогодні є актуальною задачею, незважаючи на існування низки відомих методів.

У дисертаційній роботі вперше запропоновано конфігураційний підхід до розв'язання задач складання розкладів, зокрема, формування та оптимізації допустимих матриць розкладів. Досліджено низку властивостей матриць розкладів, запропоновано формалізацію критеріїв, вимог та алгоритмів формування й оптимізації матриць розкладів. Строго обґрунтовано низку тверджень стосовно існування допустимих матриць розкладів для різних умов, зокрема, існування та відсутності нульових елементів («вікон»), наявності та відсутності потоків за умови виконання різних критеріїв.

Основним результатом роботи є розробка низки нових методів та алгоритмів на основі властивостей модифікованих спеціальним чином перманент матриць розкладів. Перманентний підхід до розв'язання задач генерації комбінаторних об'єктів у системах складання розкладів був запропонований вперше. В основі такого підходу лежить процедура розкладання модифікованого перманента за рядком із запам'ятовуванням ідентифікаторів елементів матриці, що дозволяє вибирати зручні структури даних та здійснювати миттєвий безпосередній запис окремих складових об'єктів, що генеруються. Зауважимо, що навіть процес обрахунку стандартного алгебраїчного перманента є NP-повною задачею. В нашому ж випадку мова йде про суттєву модифікацію як матриці інцидентності, так і самої процедури обрахунку перманента. У процесі обчислення модифікованого перманента важливим є не саме значення перманента, а саме процедура його розкладу, в ході якої формуються необхідні конфігурації розкладів.

Оскільки алгоритми, що пропонуються у роботі, є новими, як і сам перманентний підхід, суттєва увага приділяється складності відповідних алгоритмів та задач. Перманентний підхід порівнюється з відомими підходами до генерації комбінаторних об'єктів, зокрема, розглядається як тестова задача генерація перестановок з точки зору обчислювальної складності. Показано, що алгоритми на основі перманентного підходу на тестових задачах належать до одного і того ж класу складності, що і відомі підходи, які базуються, наприклад, на концепції лексикографічного порядку чи мають незначну перевагу по кількості арифметичних операцій (наприклад, метод перманентної декомпозиції за кількістю арифметичних операцій на 46% ефективніший від методу, що ґрунтується на відношенні порядку). Однак, перманентний підхід має низку переваг за рахунок певної універсальності – він дозволяє розв'язувати як відносно прості задачі, типу генерації перестановок, так і значно складніші – генерації розкладів за наявності потоків, пар «мигалок» (чисельник-знаменник) тощо. Відповідно, він надає можливість розробникам універсалізувати структури даних.

Оскільки результатом розкладу модифікованого перманента є усі можливі системи різних представників множин, що утворюються стовпцями матриць розкладів, то виникає проблема – як згенерувати на основі таких систем різних представників (СПП) всі можливі конфігурації розкладів, що задовольняють необхідним критеріям. Для розв'язання цієї проблеми у роботі вперше запропоновано спеціальне числення адитивно-диз'юнктивних форм (АДФ): введено означення АДФ, описано основні властивості, запропоновано застосування АДФ у процедурі декомпозиції перманента, що дозволяє генерувати усі допустимі варіанти

розкладів у процесі декомпозиції модифікованого перманента матриці інцидентності. На основі відповідного підходу запропоновані відповідні алгоритмічні рішення, які реалізовані у відповідному програмному забезпеченні.

Перманентний підхід, що запропонований у роботі та низка технічних рішень, зокрема, що ґрунтуються на АДФ, має універсальний характер та може бути використаний для розв'язання широкого кола задач у теорії розкладів.

В сучасних умовах надзвичайно важливою є проблема якомога ширшої участі усіх стейкхолдерів у процесах реалізації освітніх програм закладів вищої освіти, якомога ширше врахування їх інтересів. В роботі ця проблема розглядається у контексті врахування інтересів стейкхолдерів у процесі формування розкладу занять в закладі вищої освіти. Пропонується евристичний підхід до проблеми автоматизованого складання розкладу занять, в межах якого інтереси широкого кола стейкхолдерів максимально враховуються. Відповідний підхід був апробований при складанні розкладу занять Рівненського державного гуманітарного університету. Запропоновано відповідний програмний комплекс та низка оригінальних рішень, зокрема специфічна система кодування даних, оптимізовані з точки зору пам'яті структури даних, реалізовано основні алгоритми з використанням побітових операцій. Запропонована інформаційна система має практичне значення та може використовуватись у процесах генерації допустимих матриць розкладів.

Основні наукові результати дисертації опубліковано в 13 працях, зокрема: сім статей [2–8] у наукових фахових періодичних виданнях України; одна стаття у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу [6]; чотири публікації [9–13] у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-технічних конференцій. З них три роботи входить до міжнародної наукометричної бази Scopus [9–11], одна робота [7] входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science, одна робота [10] входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus.

Ключові слова: інформаційна технологія, перманент, декомпозиція, матриця розкладу, адитивно-диз'юнктивна форма, алгебраїчна структура.

ABSTRACT

Babich S. V. Information technology for drawing up a schedule of classes according to permanent decomposition. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.06 – information technologies. – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2023.

Abstract content. The dissertation solves the actual scientific and applied problem of forming timetable matrices based on a permanent approach with the use of special additive-disjunctive forms, which allows for improving the processes of automating time-consuming tasks of forming timetables, in particular timetables of higher education institutions, taking into account several additional criteria.

The object of the study is the process of drawing up an optimal schedule of classes using a permanent approach.

The subject of the study is the models, methods, and means of information technology for making an optimal schedule of classes using a permanent approach.

The work includes an analysis of known approaches, methods, information technologies, and tools for solving calendar planning problems.

The presence of a wide variety of known approaches is due to the significant computational complexity of the corresponding tasks, in particular, the task of creating a class schedule is multi-criteria and NP-complete. Therefore, heuristic approaches, expert evaluations, and genetic algorithms, along with optimization methods and combinatorial algorithms, which have accurate estimates of computational complexity, are widely used to solve such problems.

The relevance of such problems is also determined by the fact that in practice they often have several specific requirements that significantly affect the algorithmic implementation and the choice of the method of their solution. The criteria that arise when drawing up schedules are often antagonistic and require certain compromise solutions. The tasks of automated schedule generation have significant computational complexity. Therefore, the development of new approaches and algorithms for solving scheduling problems is still an urgent task today, despite the existence of some known methods. In the dissertation, for the first time, a configurational approach to the solution of scheduling problems is proposed, in particular, the formation and optimization of admissible scheduling matrices. Some properties of schedule matrices were studied, and formalization of criteria, requirements, and algorithms for the formation and optimization of schedule matrices was proposed. Some assertions regarding the existence of admissible matrices of schedules for various conditions are strictly substantiated, in particular, the existence and absence of zero elements ("windows"), and the presence and absence of flows provided that various criteria are met.

The main result of the work is the development of many new methods and algorithms based on the properties of specially modified permanent matrices of schedules. A permanent approach to solving the problems of generating combinatorial objects in scheduling systems was proposed for the first time. The basis of this approach is the procedure of decomposing the modified permanent by row with memorization of the identifiers of the matrix elements, which allows you to choose convenient data structures and carry out the instant direct recording of individual component objects that are generated. Note that even the process of calculating the standard algebraic constant is an NP-complete problem. In our case, we are talking about a significant modification of both the incidence matrix and the permanent calculation procedure itself. In the process of calculating the modified permanent, it is not the value of the permanent that is important, but rather the procedure of its schedule, during which the necessary schedule configurations are formed.

Since the algorithms proposed in the paper are new, as is the permanent approach itself, significant attention is paid to the complexity of the corresponding algorithms and tasks. The permanent approach is compared with known approaches to the generation of combinatorial objects, in particular, the generation of permutations is considered a test task from the point of view of computational complexity. It is shown that algorithms based on the permanent approach to test problems belong to the same complexity class as well-known approaches that are based, for example, on the concept of lexicographic order or have a slight advantage in terms of the number of arithmetic operations (for example, the

method of permanent decomposition by the number of arithmetic operations is 46% more efficient than the method based on the order ratio). However, the permanent approach has several advantages due to a certain universality – it allows solving both relatively simple tasks, such as the generation of permutations, and much more complex ones – the generation of schedules in the presence of flows, pairs of "blinkers" (numerator-denominator), etc. Accordingly, it enables developers to universalize data structures.

Since the result of the schedule of the modified permanent is all possible systems of different representatives of sets formed by the columns of the schedules matrices, the problem arises - how to generate based on such systems of different representatives (SRP) all possible configurations of schedules that satisfy the necessary criteria. To solve this problem, a special calculation of additive-disjunctive forms (ADF) is proposed for the first time in the work: the definition of ADF is introduced, the main properties are described, the application of ADF in the permanent decomposition procedure is proposed, which allows generating all admissible variants of schedules in the process of decomposition of a modified permanent incidence matrix. Based on the appropriate approach, appropriate algorithmic solutions are proposed, which are implemented in the appropriate software.

The permanent approach proposed in the work and several technical solutions, in particular, based on ADF, have a universal character and can be used to solve a wide range of problems in the theory of schedules. In today's conditions, the problem of the widest possible participation of all stakeholders in the processes of implementing educational programs of higher education institutions, the widest possible consideration of their interests, is extremely important. In the work, this problem is considered in the context of taking into account the interests of stakeholders in the process of forming the schedule of classes in a higher education institution. A heuristic approach to the problem of automated preparation of the class schedule is proposed, within which the interests of a wide range of stakeholders are taken into account as much as possible. The corresponding approach was tested when drawing up the class schedule of the Rivne State Humanitarian University. An appropriate software package and some original solutions are proposed, including a specific data encoding system, optimized from the point of view of the memory of the data structure, and basic algorithms using bitwise operations are implemented. The proposed information system is of practical importance and can be used in the processes of generating admissible matrixes of schedules.

The main scientific results of the dissertation were published in 13 works, in particular: seven articles [2–8] in scientific and professional periodicals of Ukraine; one article in periodical scientific publications of other countries that are members of the Organization for Economic Cooperation and Development and/or the European Union [6]; four publications [9–13] in the materials of international and all-Ukrainian scientific, scientific and technical conferences. Of them, three works are included in the international scientometric database Scopus [9–11], one work [7] is included in the international scientometric database Web of Science, and one work [10] is included in the international scientometric database Index Copernicus.

Keywords: information technology, permanent, decomposition, decomposition matrix, additive-disjunctive form, algebraic structure.

Підписано до друку 06.06.2023 р. Формат 60×90^{1/16}.
Ум.-друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 5610.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*